

GPU計算による フェーズドアレイ探触子の音場モデリングと きずイメージングの高速化について

愛媛大学

中畑 和之

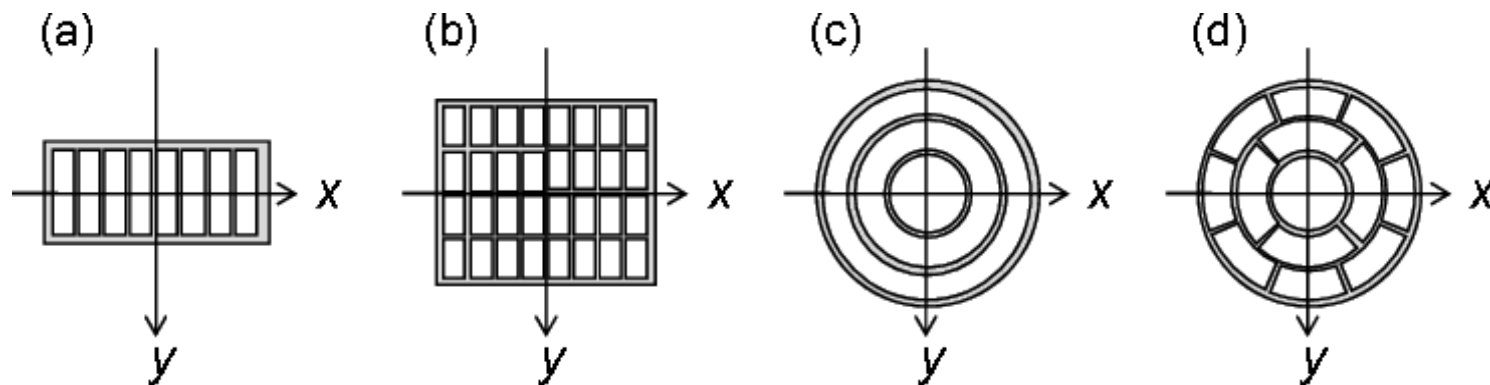
1.アレイ探触子のモデリングと放射特性

1)中畑和之, 石川千智, 河野尚幸,
超音波リニア・マトリクスアレイ探触子の3次元放射音場のモデル化とその性能比較,
日本機械学会A編, Vol.75(759), pp.1468-1475, 2009.

2)中畑和之, 河野尚幸,
超音波フェーズドアレイ探触子による音場の3Dモデリングと送信ビームの特徴について,
非破壊検査, Vol.62(2), pp.76-83, 2013.

- 1.1 探触子の種類とモデリング
- 1.2 周波数領域から音場を眺めてみる
- 1.3 アレイ探触子の放射特性
(基本, フォーカシング, ステアリング)

1.1 アレイ探触子の種類とモデリング



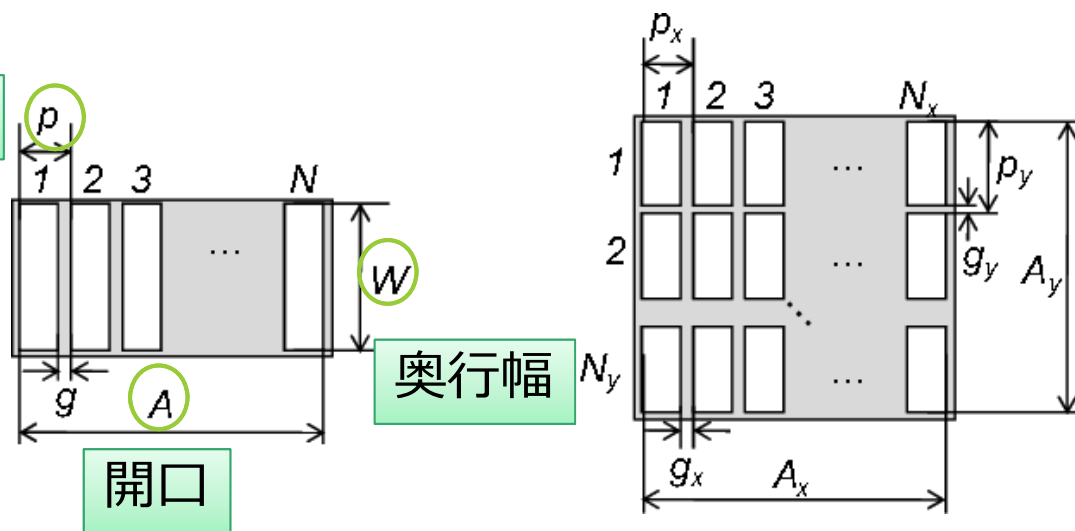
リニアアレイ

マトリクスアレイ

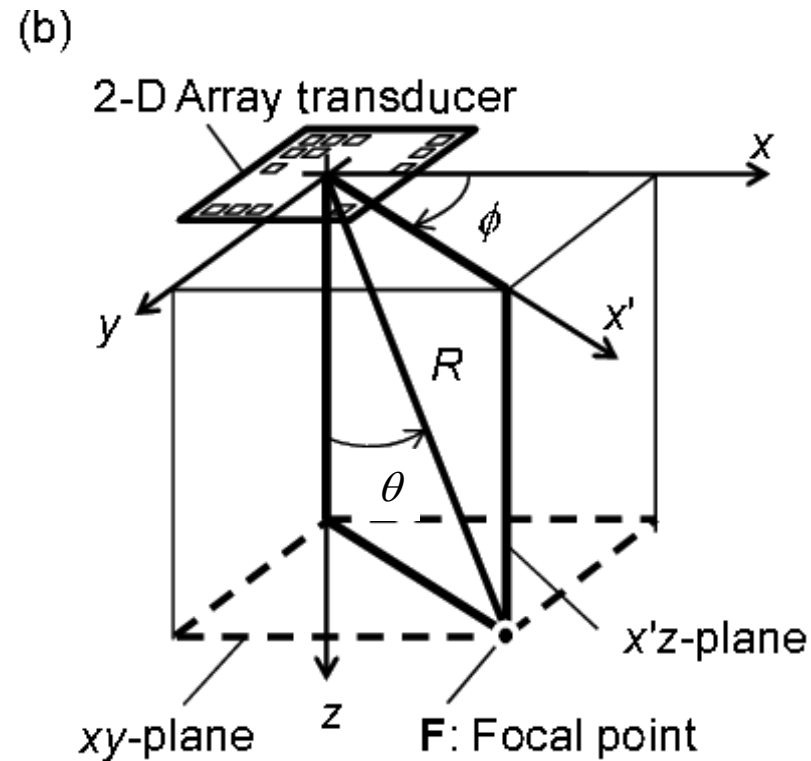
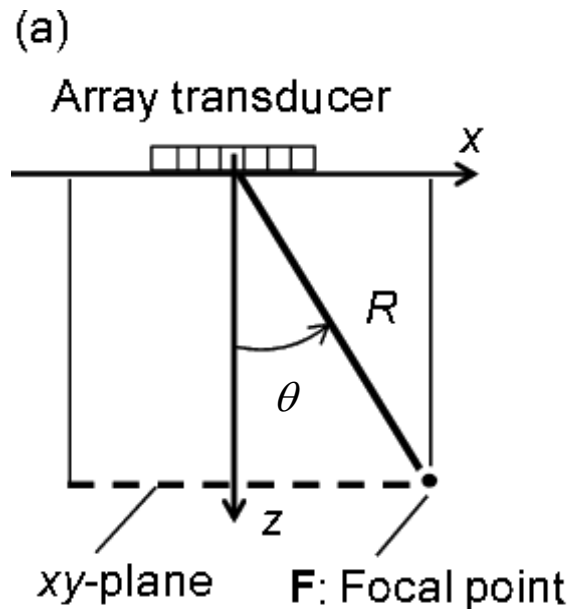
アニュラアレイ

分割型アニュラアレイ

ピッチ



ステアリングとフォーカシング



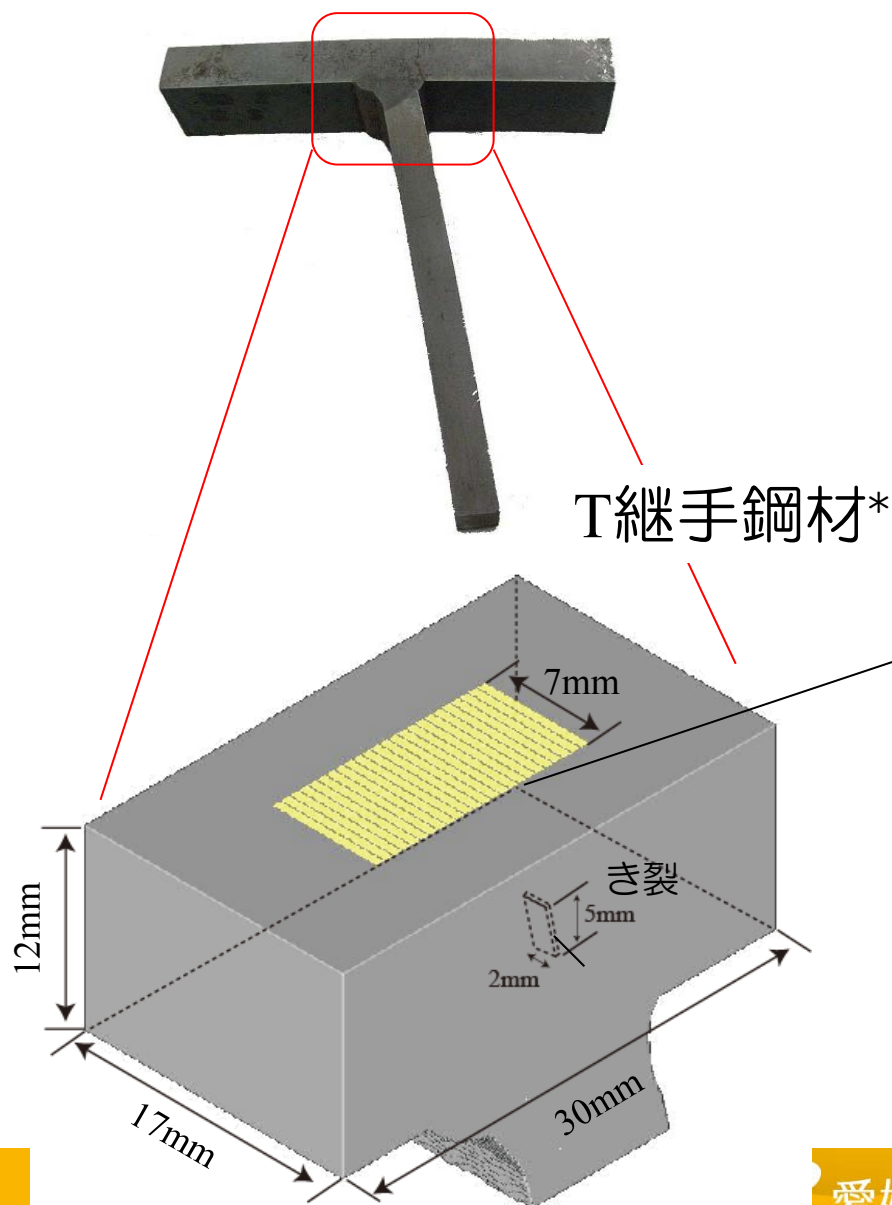
リニアアレイの遅延パターン²⁾

$$\Delta\tau(x; F) = \frac{R}{c} \left[1 - \sqrt{\left(\sin\theta - \frac{x}{R} \right)^2 + \cos^2\theta} \right]$$

マトリクスアレイの遅延パターン²⁾

$$\Delta\tau(\mathbf{x}; F) = \frac{R}{c} \left[1 - \sqrt{\left(\sin\theta \cos\phi - \frac{x}{R} \right)^2 + \left(\sin\theta \sin\phi - \frac{y}{R} \right)^2 + \cos^2\theta} \right]$$

モデル化例：T継手鋼材中の波動伝搬シミュレーション



＜解析方法と条件＞

動弾性有限積分法

送信パルス	1.5波のリッカー波
中心周波数	4.0MHz
セル長	$\Delta x = 0.02\text{mm}$
総ボクセル数	約10億個
時間ステップ	$\Delta t = 1\text{ns}$
総ステップ数	5500ステップ

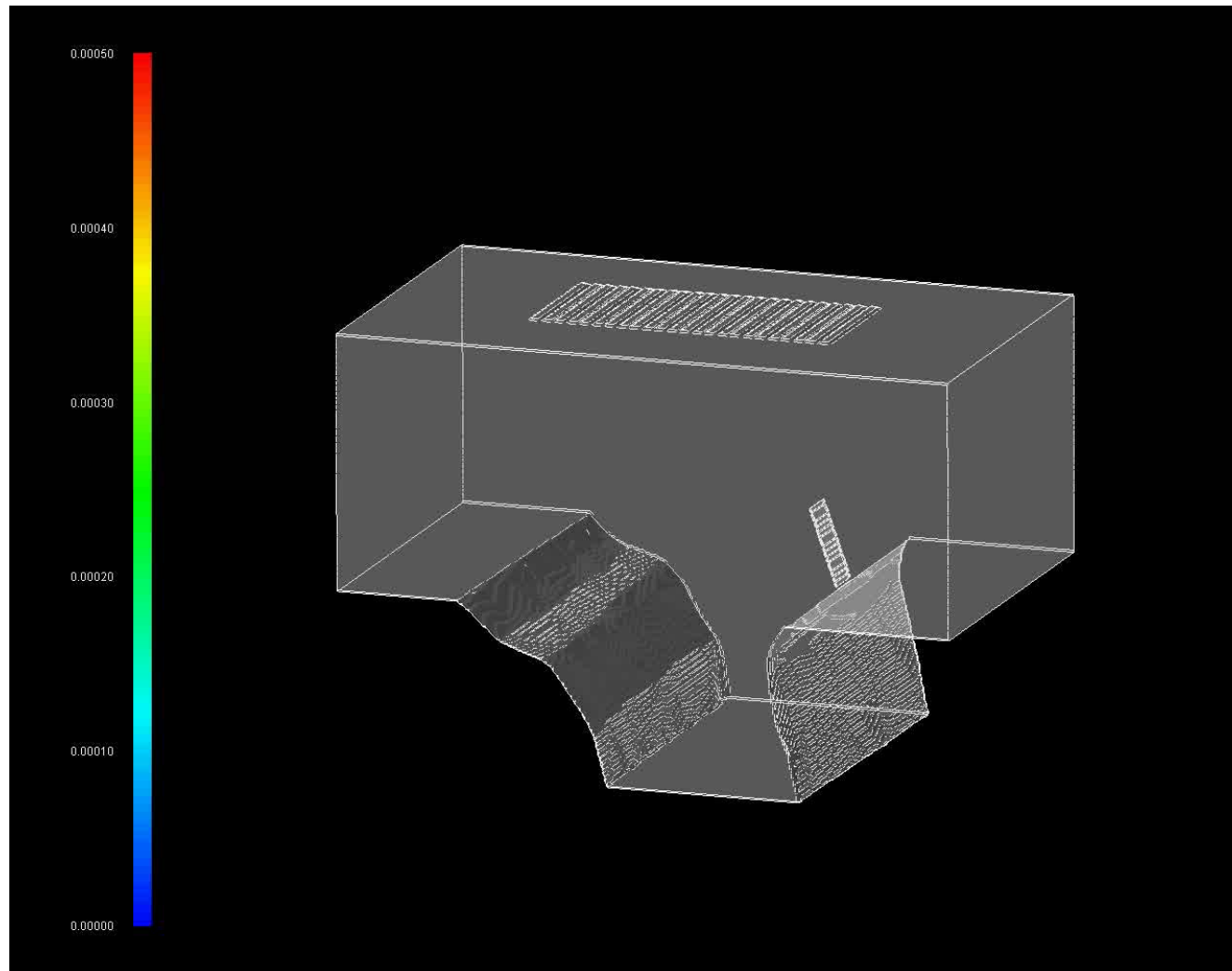
フェーズドアレイ

0.5mm	素子数	24個
0.6mm	素子幅	0.5mm
	ピッチ長	0.6mm

鋼材

($C_p = 5800\text{m/s}$, $C_s = 3100\text{m/s}$, $\rho = 7900\text{kg/m}^3$)

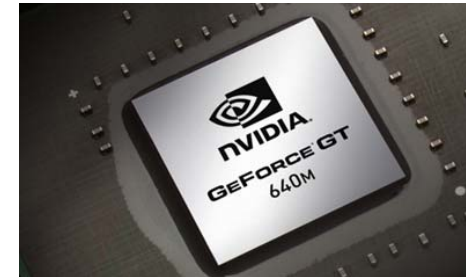
T継手鋼材中の波動伝搬シミュレーション-Movie



シミュレータ(SWAN21)

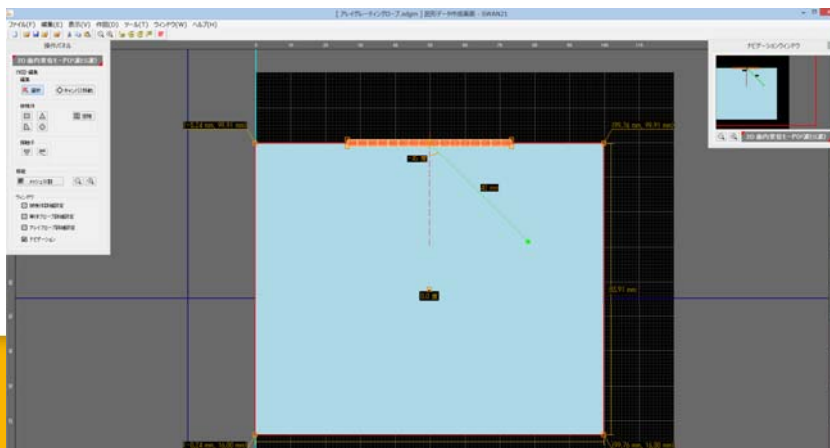
GPUによる超高速計算

(愛媛大開発の動弾性有限積分法の超並列化コード)

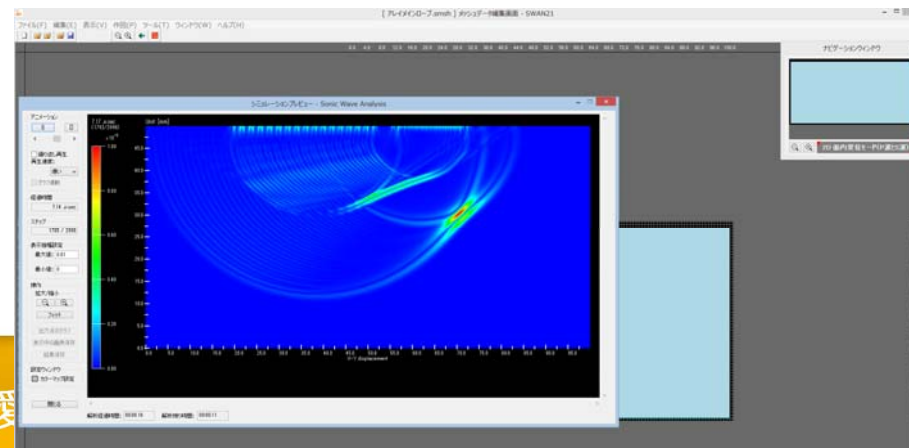


GPUの価格は、ミドルクラスで数万円程度、ハイエンドで数十万円。
PCの空きスロットに差し込むだけで使用開始。ノートPCで駆動可能。
(このSony VIAOにGeforce GT640Mを搭載しています)

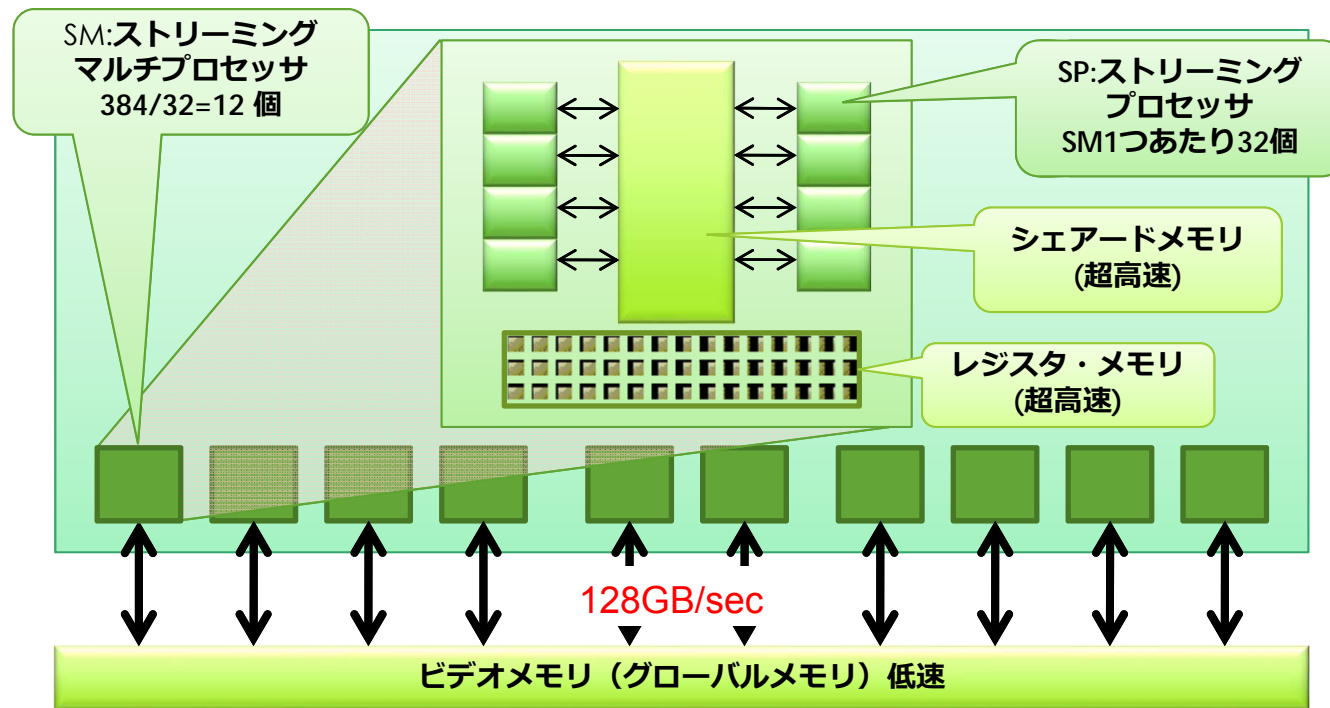
高機能GUIの設計・開発 (ジャンプローブ(株), eCompute(株)と共同開発)



愛



GPGPU(General-purpose computing on GPU)



		GeForce GTX560 (GPU)	Core i7 965 (CPU)
プロセッサ性能	コア数	384	4
	クロック(MHz)	1645	3200
	ピーク演算性能	1.26Tflops	51.2Gflops
メモリ	標準メモリ設定	1GB GDDR5	各自PCによる(DDR3)
	メモリバンド幅(GB/sec)	128	25.6

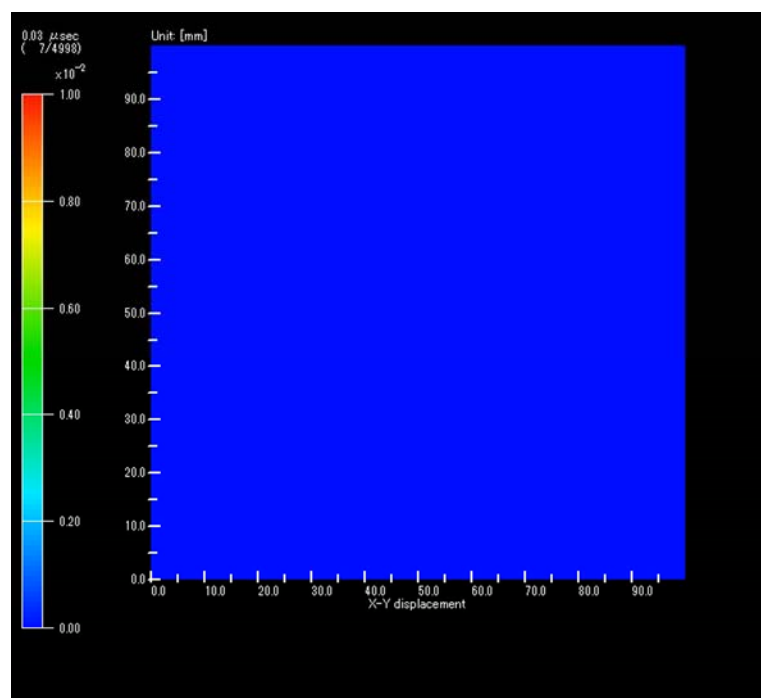
素子数 $N=16$ 個, 焦点距離 $R=40\text{mm}$, 音速 $c_p=5900\text{m/s}$
ステアリング45度, 中心周波数2MHz(波長: 2.95mm)



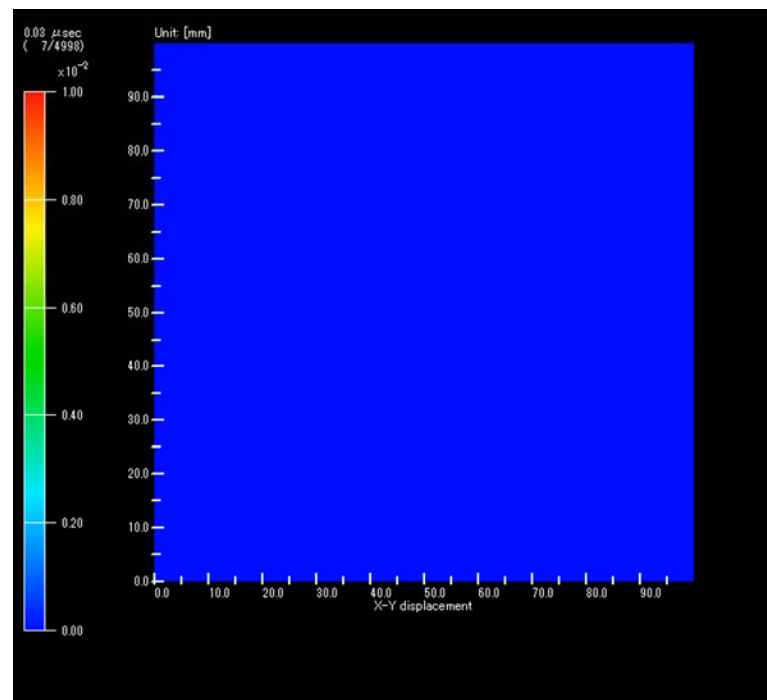
実際にリアルタイムデモをご覧ください.

時間域の伝搬挙動

素子ピッチ $p=1.475\text{mm}$
(半波長)



素子ピッチ $p=2.95\text{mm}$
(同波長)



1.2 周波数域から音場を眺めてみる

入力プロファイル
(表面力を励起)

フーリエ変換

入力のフーリエスペクトル

$$\hat{T}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{T}(\mathbf{x}) \hat{f}(t) \quad \longrightarrow \quad \mathbf{T}(\mathbf{x}, \omega) = \mathbf{T}(\mathbf{x}) \boxed{f(\omega)}$$



EFITの入射波として用いる.
SWAN21による計算



$$\hat{\mathbf{v}}(\mathbf{x}, t)$$

出力のフーリエスペクトル

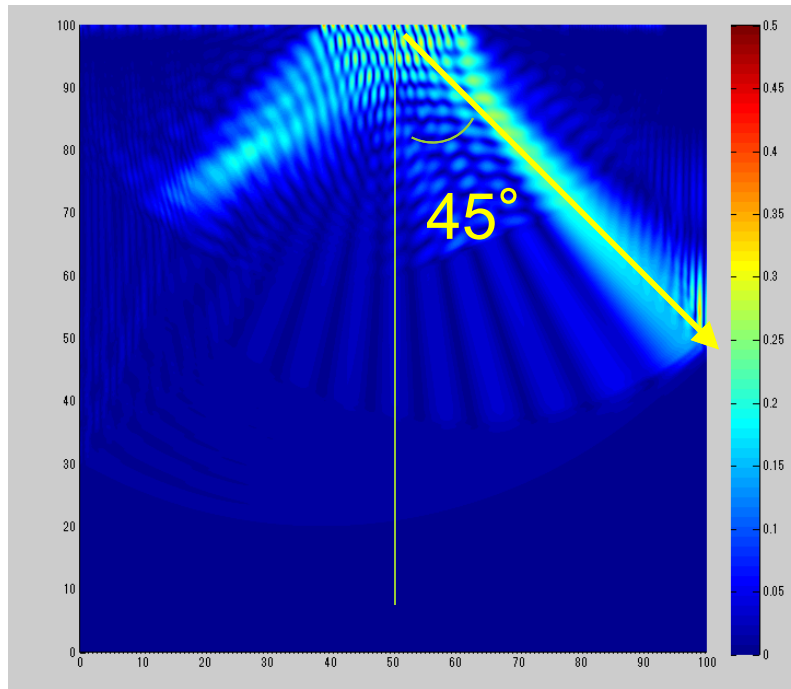
フーリエ変換

$$\hat{\mathbf{v}}(\mathbf{x}, t) = \hat{\mathbf{v}}^{rad}(\mathbf{x}, t) \otimes \hat{f}(t) \quad \longrightarrow \quad \boxed{\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)} = \mathbf{v}^{rad}(\mathbf{x}, \omega) \boxed{f(\omega)}$$

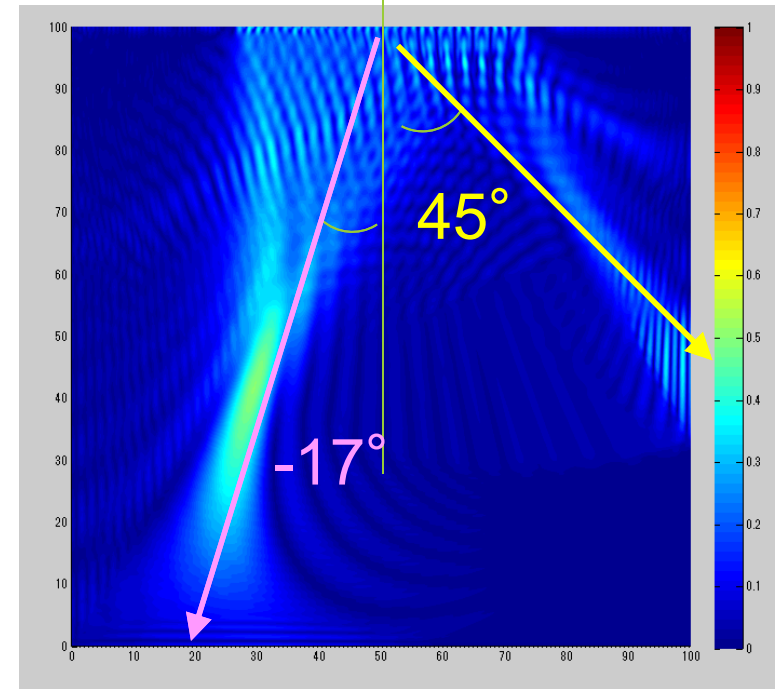
$$\mathbf{v}^{rad}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{\boxed{\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}}{\boxed{f(\omega)}}$$

放射音場(周波数領域)の抽出
(実際には Wienerフィルタを使用)

メインローブとグレーティングローブ



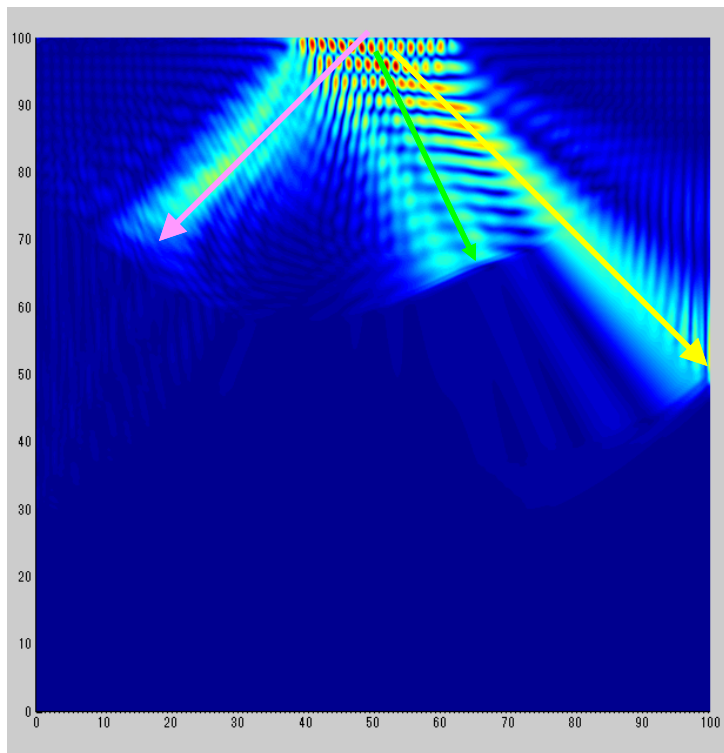
放射音場 $v_y^{\text{rad}}(\mathbf{x}, f)$, $f=2\text{MHz}$
 素子ピッチ $p=1.475\text{mm}$ (半波長)



放射音場 $v_y^{\text{rad}}(\mathbf{x}, f)$, $f=2\text{MHz}$
 素子ピッチ $p=2.95\text{mm}$ (同波長)

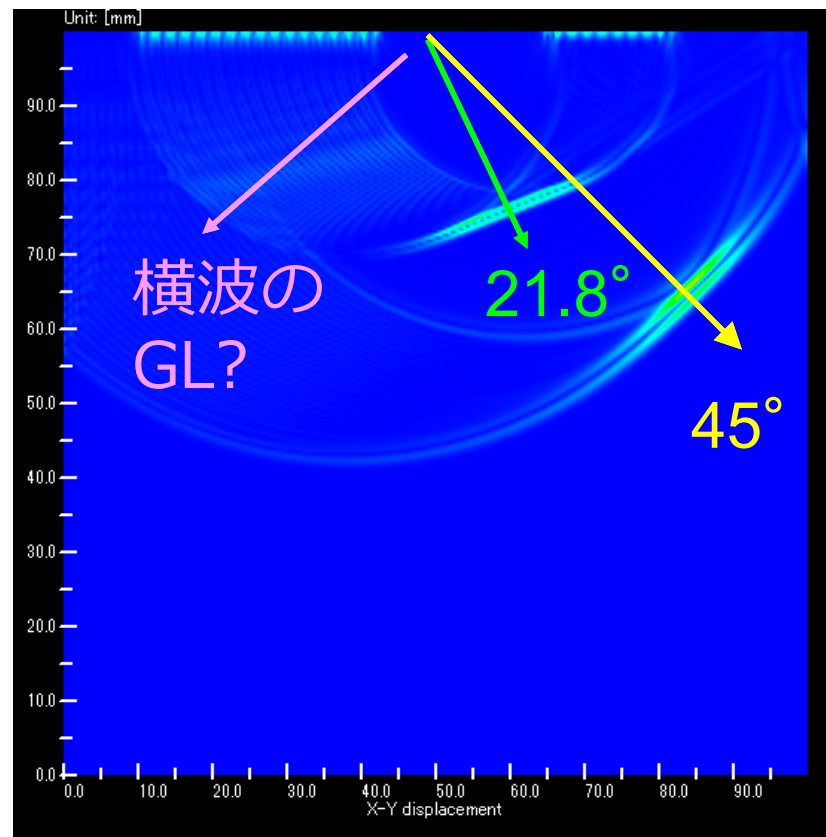
グレーティングローブ
 の発生角の理論式¹⁾

$$\begin{aligned} \sin \theta' &= \sin \theta - n\lambda/p \\ &= \sin 45 - 2.95 / 2.95 = -0.293 \Rightarrow \theta' = -17 \end{aligned}$$



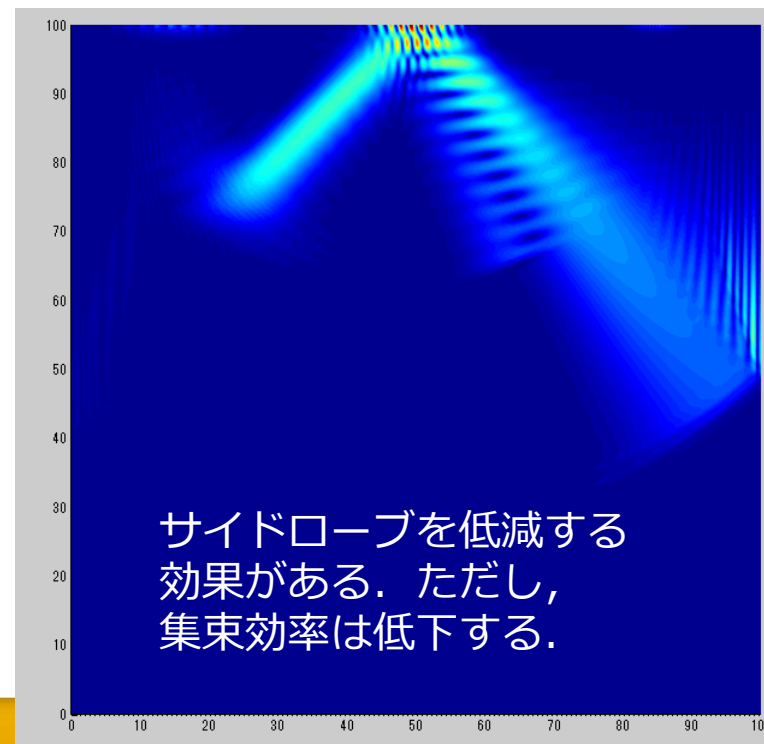
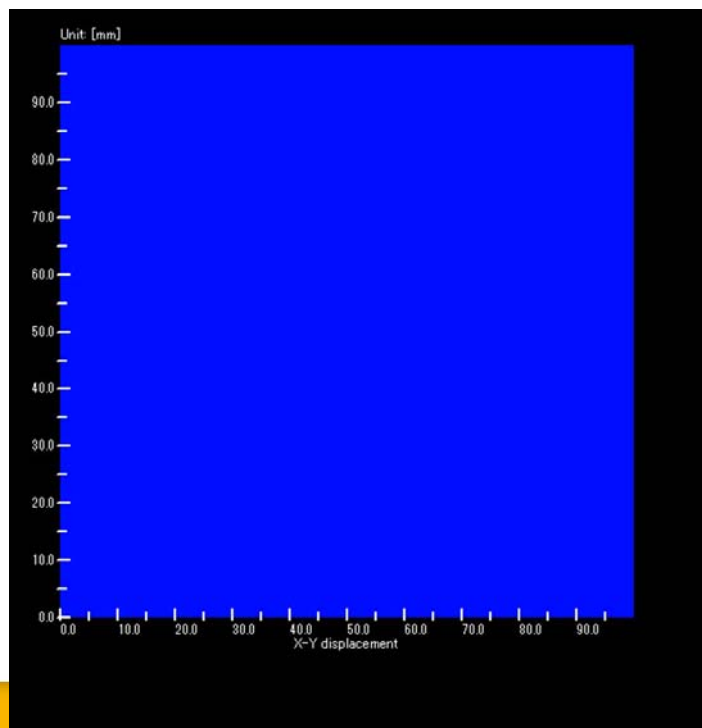
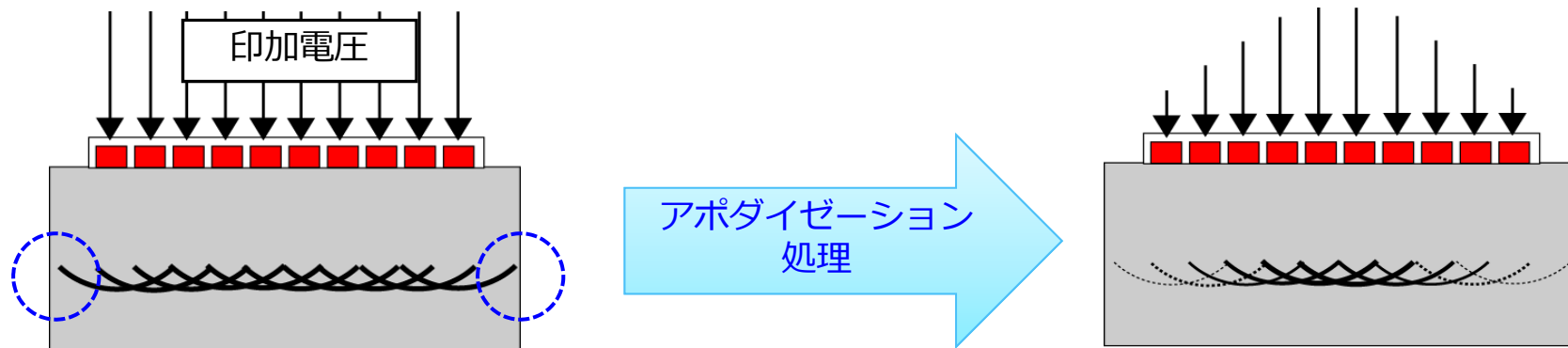
放射音場 $v_y^{\text{rad}}(\mathbf{x}, f)$, $f=2\text{MHz}$
 素子ピッチ $p=1.475\text{mm}$ (半波長)

$$\begin{aligned} \sin \theta' &= \sin \theta_T - n\lambda/p \\ &= \sin 21.8 - 1.55 / 1.475 = -0.679 \Rightarrow \theta' = -43 \end{aligned}$$



$$\sin \theta_T = \frac{c_T}{c_L} \sin \theta = \frac{3.1}{5.9} \sin 45 = 0.372 \Rightarrow \theta_T = 21.8$$

アポダイゼーション



マルチガウシアンビームモデル

ガウシアンビームの重ね合わせで放射音場を表現する手法*

(レイリー積分法の近似解法)

矩形探触子


$$u(\mathbf{x}', \omega) = \frac{iP_0 d_p \theta_p}{\rho k_p c_p^2} \sum_k^{10} \sum_l^{10} \frac{A_k A_l \exp(ik_p R)}{\sqrt{1+iB_k R/D_x} \sqrt{1+iB_l R/D_y}} \\ \times \exp\left(-\frac{ik_p}{2} \frac{(x')^2/R}{1+iB_k R/D_x}\right) \exp\left(-\frac{ik_p}{2} \frac{(y')^2/R}{1+iB_l R/D_y}\right)$$

$$R = \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2}$$

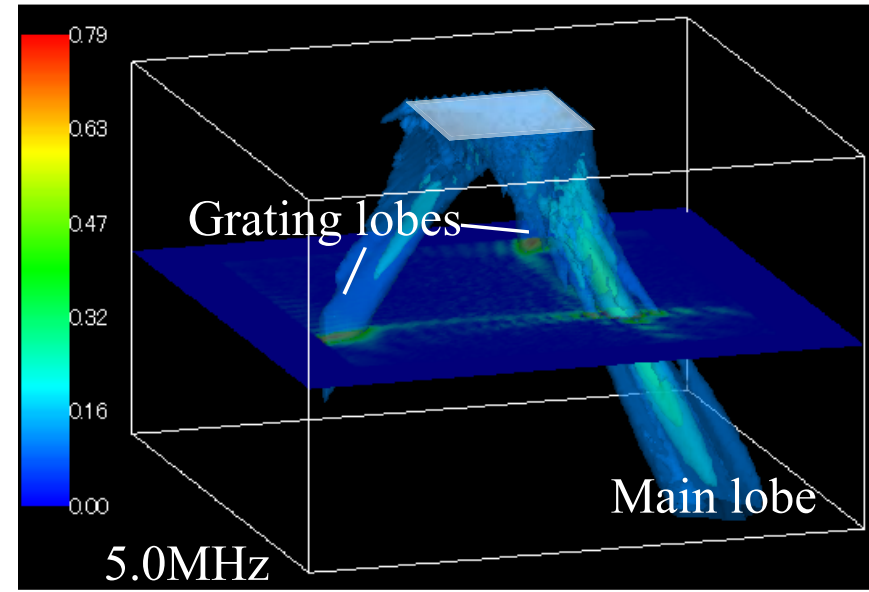
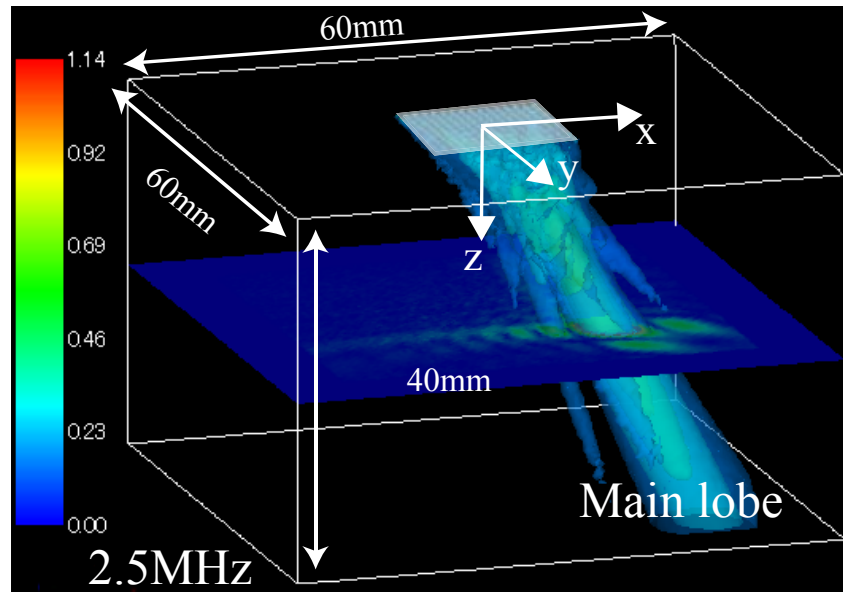
$$D_x = k_p a_x^2 / 2, \quad D_y = k_p a_y^2 / 2$$

AとBは複素数からなる10個のパラメータ

アレイ探触子¹⁾


$$u(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M u(\mathbf{x}', \omega) \exp(i\omega \Delta\tau_{ij}(\mathbf{x}; \theta, \phi))$$

*Schmerr, L.W., A multigaussian ultrasonic beam model for high performance simulations on a personal computer, Materials Evaluation, Vol.58, pp.882-888, 2000.



正方形の素子,
素子ピッチ(p_x, p_y)=(1.0mm,1.0mm), $g=0.1$ mm, 16×16 個配列

$$F = (10\text{mm}, 10\text{mm}, 20\text{mm})$$

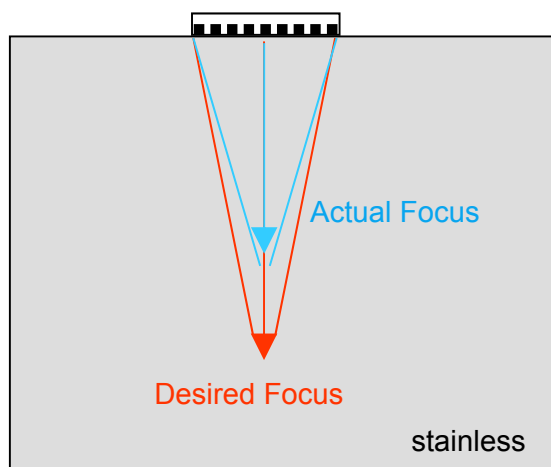
もちろんGPU計算で
3D音場計算でも超高速！
($\Delta x=0.1$ mmで約2秒)

1.3 アレイ探触子の特性1(基本)

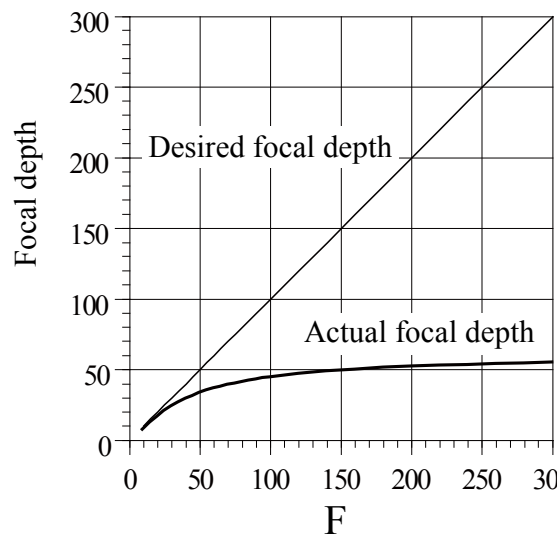
レイリー距離
(近距離音場)

$$R = \frac{A^2}{4\lambda}$$

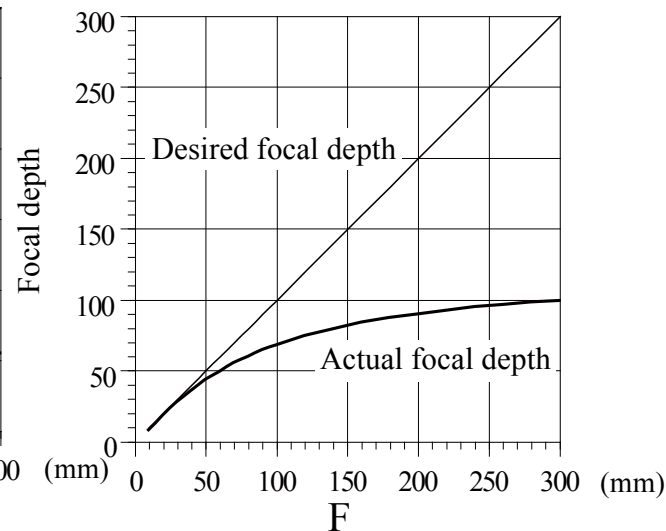
- 1)設計した焦点距離より
実際は手前に集束する.
- 2)レイリー距離が集束限界の目安.
- 3)リニアアレイの場合, $W/A < 0.5$ が基本.



N=24, p=1.0mm(g=0.1mm)
A=23.9mm
(2MHz) $\lambda=2.9$ mm, R=49.2mm
(4MHz) $\lambda=1.475$ mm, R=98.4mm

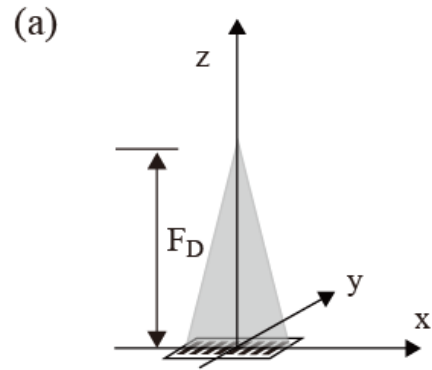


2MHz

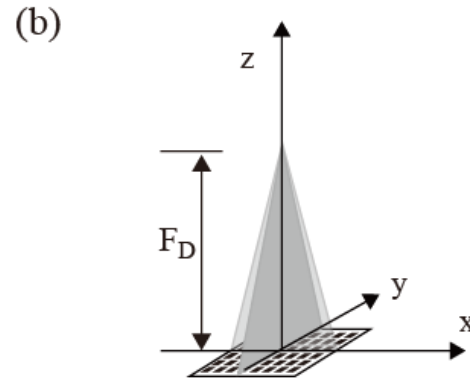


4MHz

1.3 アレイ探触子の特性2(フォーカシング)

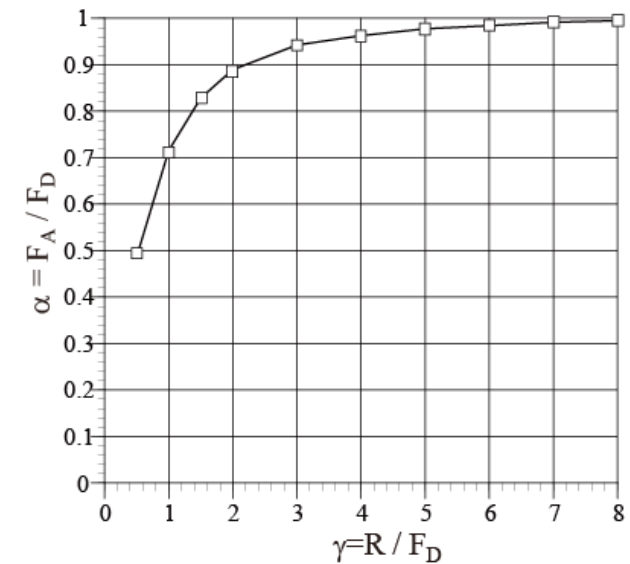
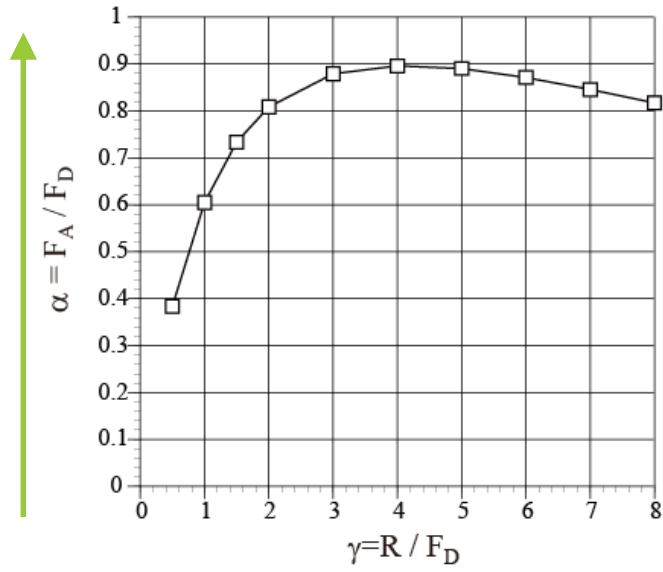


Linear array transducer
($p=1.0\text{mm}$, $g=0.1\text{mm}$, $W/A=0.3$, $f=4\text{MHz}$, $N=24$)



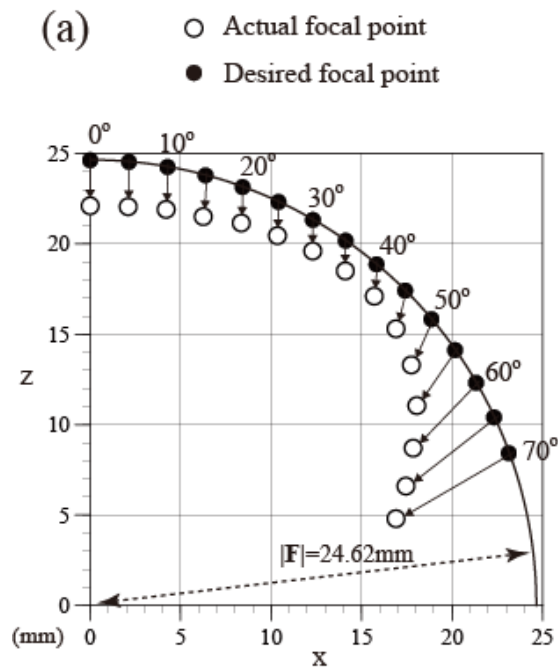
Matrix array transducer
($p_x=1.0\text{mm}$, $g_x=0.1\text{mm}$, $p_y=1.0\text{mm}$, $g_y=0.1\text{mm}$,
 $A_y/A_x=1.0$, $f=4\text{MHz}$, $N=M=24$)

実際と設計焦点が近づく

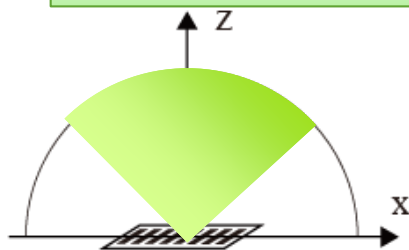


焦点位置が浅い

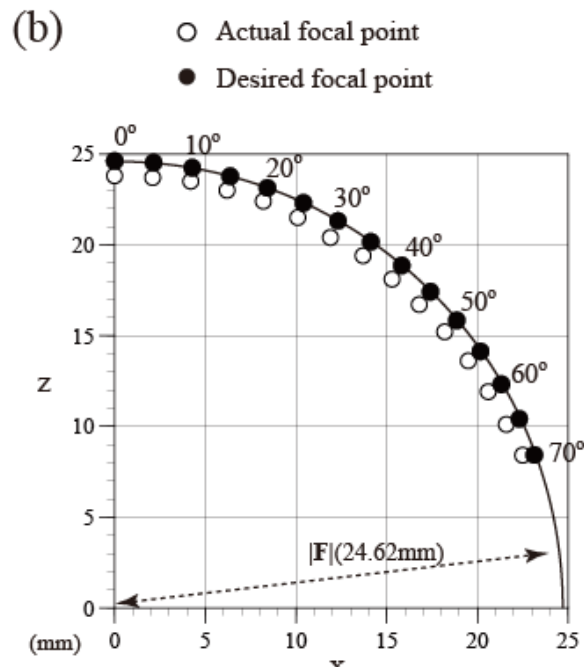
1.3 アレイ探触子の特性3(ステアリング)



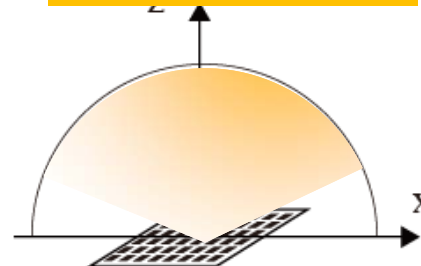
45°以上は像を結べない



Linear array transducer
($p=1.0\text{mm}$, $g=0.1\text{mm}$, $W/A=0.3$, $f=4\text{MHz}$, $N=24$, $|F|=24.62\text{mm}$)



70°程度までいける



Matrix array transducer
($p_x=p_y=1.0\text{mm}$, $g_x=g_y=0.1\text{mm}$, $A_y/A_x=1.0$, $f=4\text{MHz}$, $N=M=24$, $|F|=24.62\text{mm}$)

2. アレイ探触子によるきずの映像化

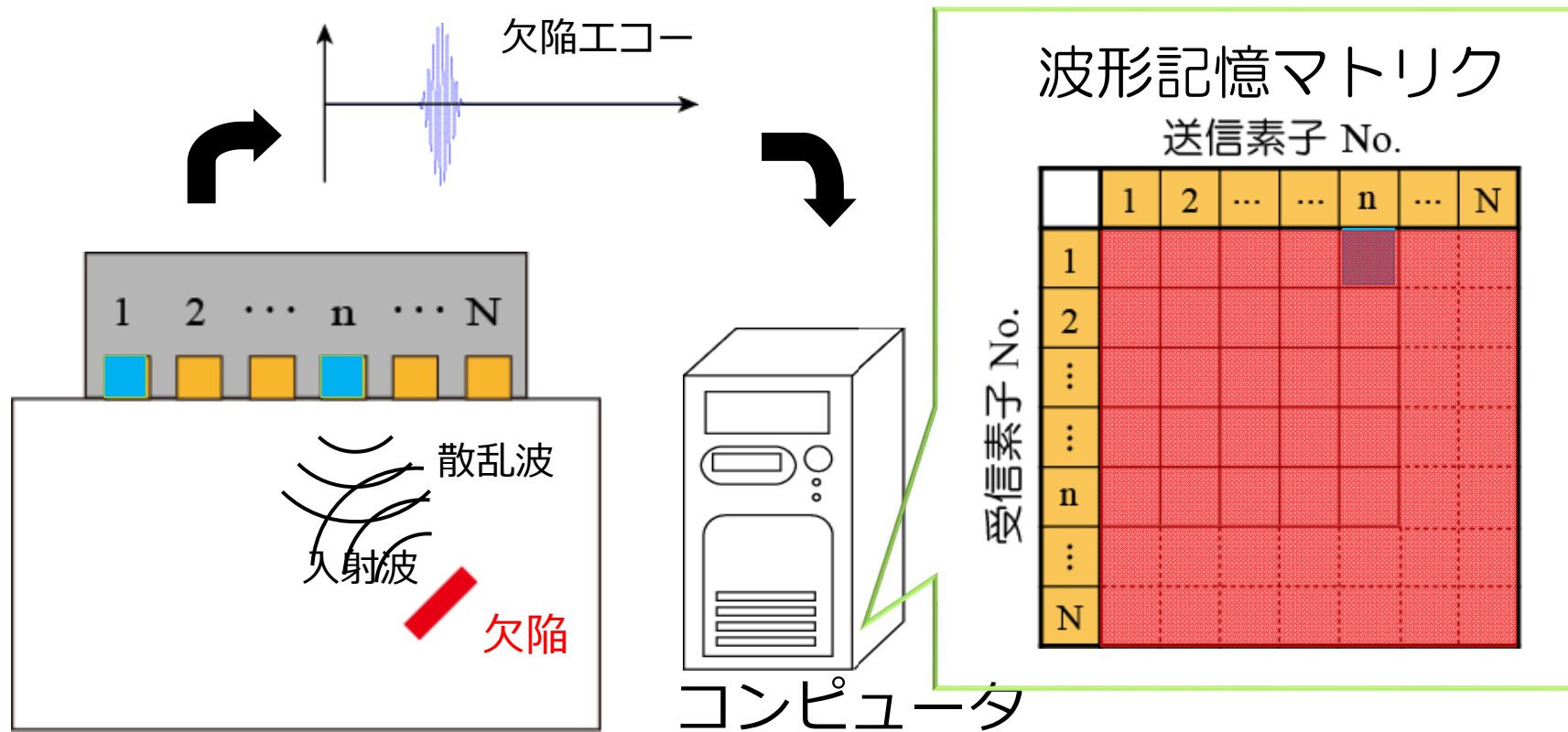
- 3) 中畑和之, 平田正憲, 廣瀬壮一, 全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成, 非破壊検査, Vol.59, No.6, pp.277-283, 2010.
- 4) 中畑和之, 徳増純男, 可撓性アレイプローブを用いた不規則面からの内部きずの超音波映像化, 信学技報, Vol.112, No.84, US2012-13, pp.1-5. 2012.
- 5) 中畑和之, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一, GPU計算による非破壊検査のための超音波イメージングの高速化, 計算工学講演会論文集, 第17巻, C-7-1, 2012.
- 6) 中畑和之, 川村 郡, 岡崎慎一郎, 廣瀬壮一, 低周波アレイ探触子を用いたFSAP方式によるコンクリート中の空洞欠陥の超音波映像化, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.105-114, 2012.

- 2.1 全波形サンプリング処理(FSAP)方式
- 2.2 フレキシブルアレイ探触子による映像化
- 2.3 低周波アレイ探触子によるコンクリートの映像化

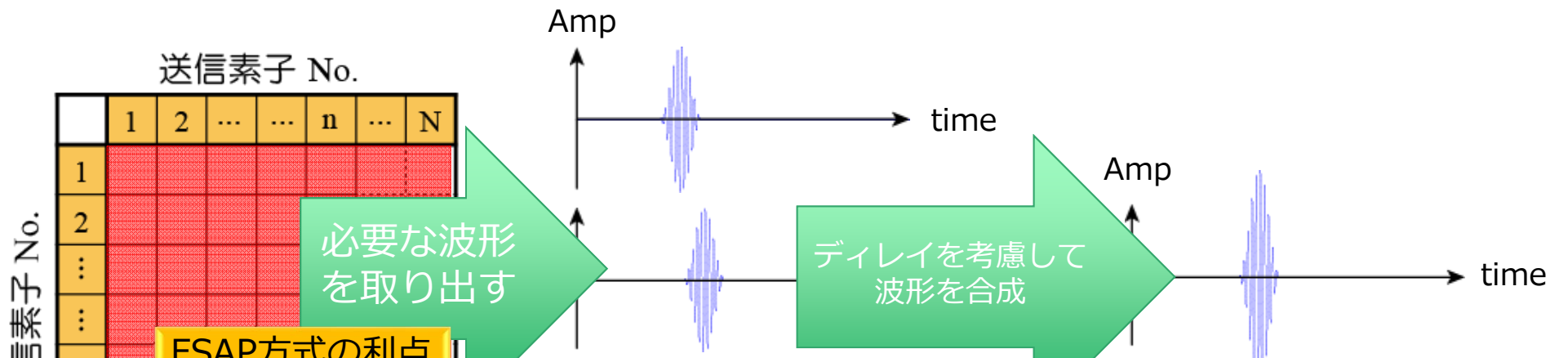
2.1 全波形サンプリング処理方式

全波形サンプリング処理(FSAP : Full-wave Sampling and Processing)

…電子スキャン装置上ではなく、PC上でディレイの設定を行い波形を重ねる手法³⁾



➡ 波形記憶マトリクスが埋まるように全ての送受信パターンを計測

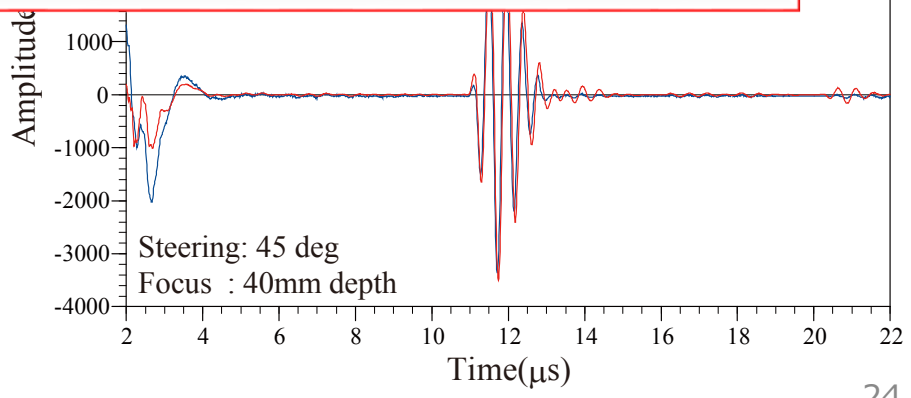
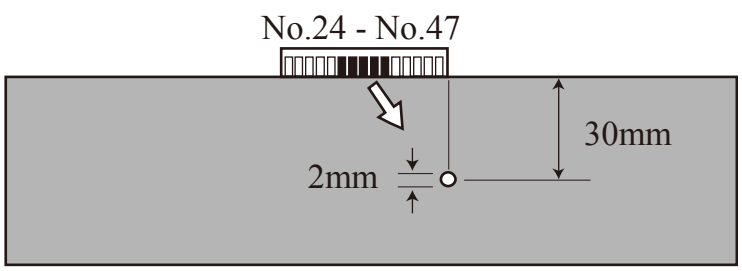


FSAP方式の利点

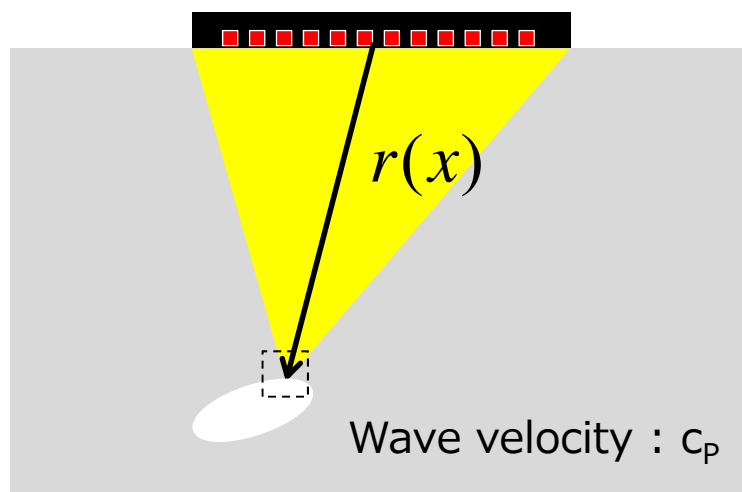
原波形をPC上に保存しているので...

- ➡ 計測後でも、波形処理やフィルタリング等ができる。
- ➡ 送信フォーカスも受信フォーカスも可能。
- ➡ GPU計算を用いて高速可視化ができる。

FSAP
ES3100

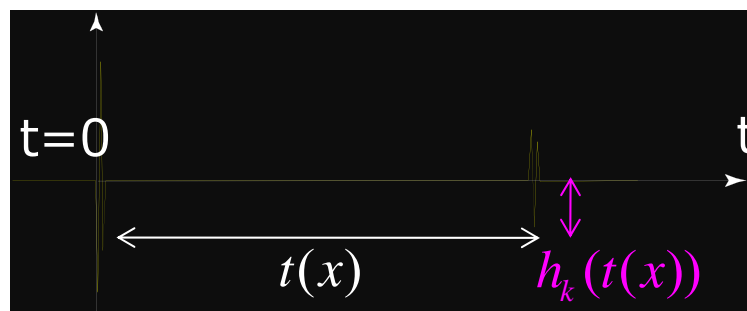


FSAPを用いた映像化方法

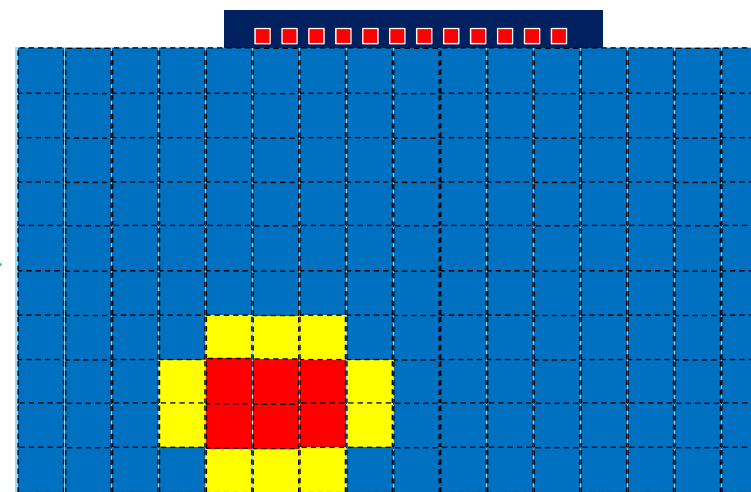


任意の位置（画素）にフォーカス
ビームを送信出来るため、プローブ
中心と対象画素までの路程から到達
時間を計算する。

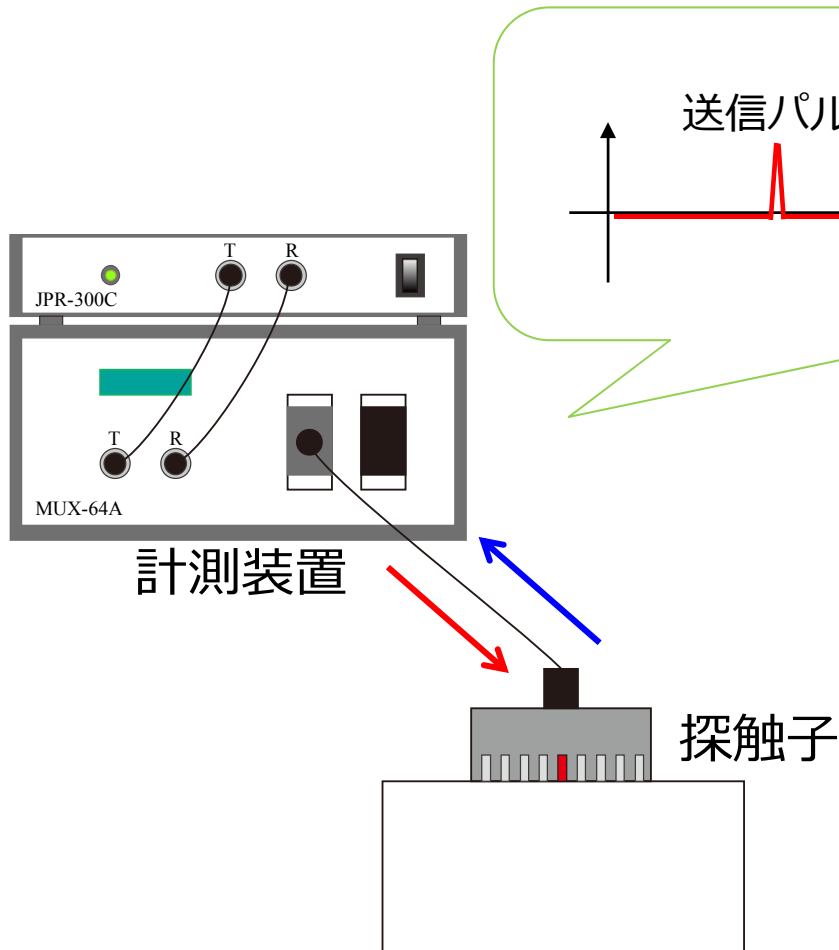
$$t(x) = \frac{2 \times r(x)}{c_p}$$



到達時間に相当
する振幅値をプ
ロット



波形処理(デコンボリューション処理)



探触子の特性, 計測装置の電気回路等の影響により変調された波形が発生.

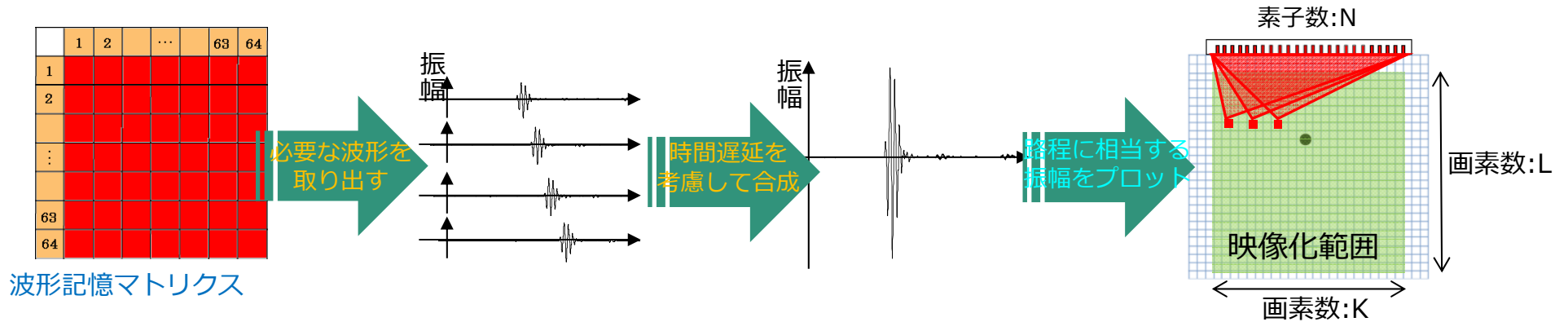


波数が多い場合や低周波の場合には, 高い空間分解能が得られない.



リファレンス波形を取得することで, 欠陥エコーから散乱振幅を抽出する.

GPU計算を導入したFSAP方式⁵⁾



1画素に対して波形記憶マトリクスより時間遅延を考慮して波形を合成する

$$\text{計算回数} = K \times L \times N^2$$

すべて独立な画素計算

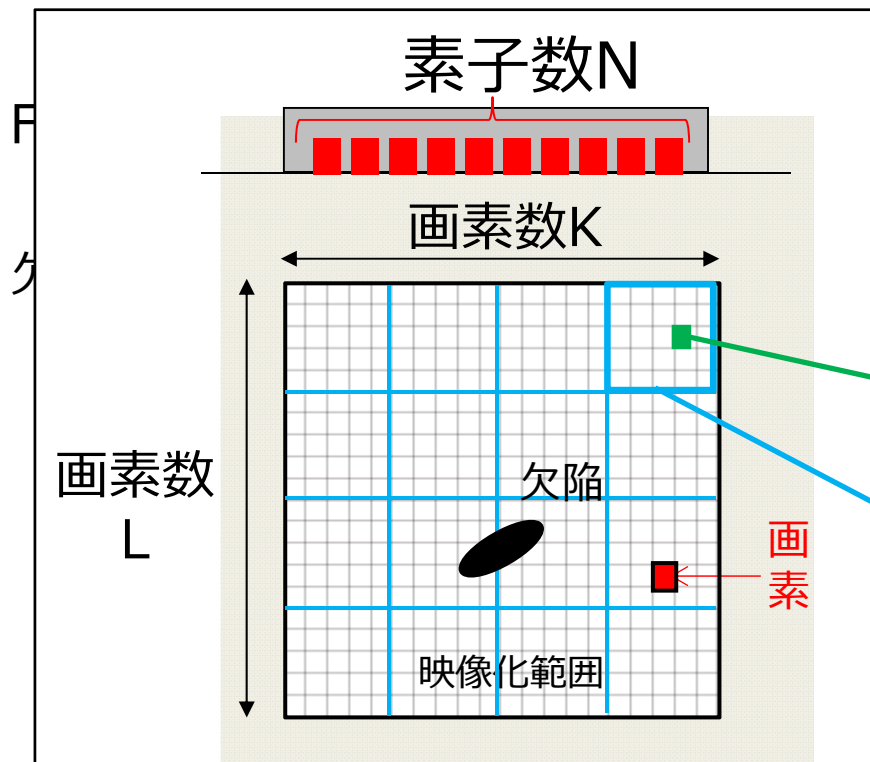
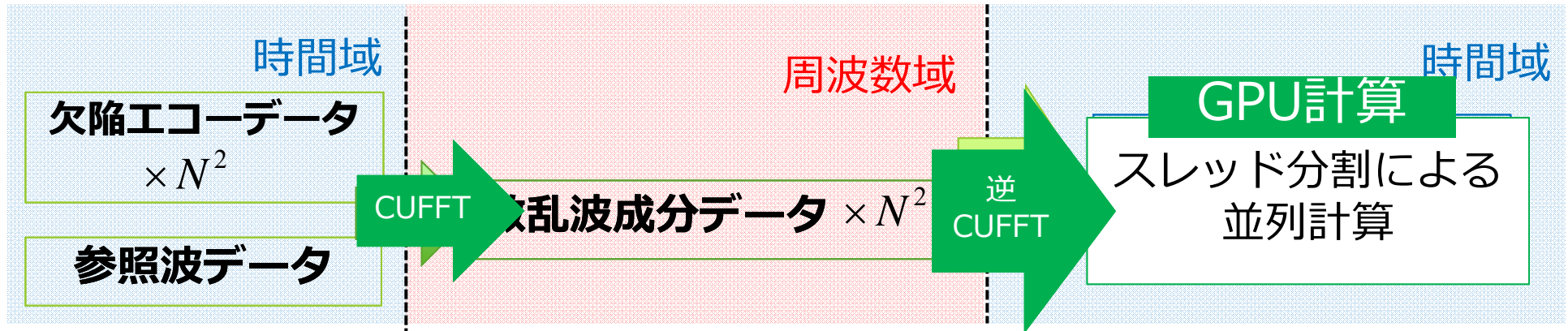
GPU計算による高速化

NVIDIA の統合開発環境CUDAを用いる

①計測

②波形処理

③欠陥映像化



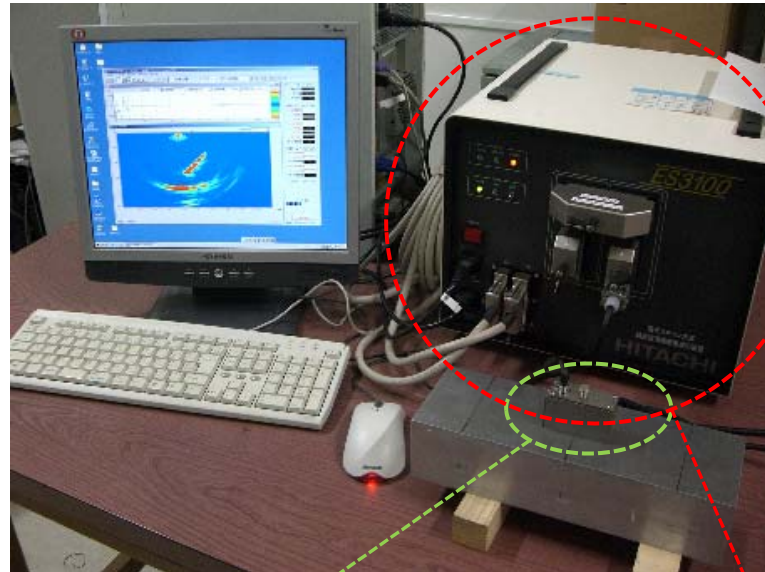
CUFFTライブラリによる高速処理

スレッドとブロックによる
画素値の並列計算

スレッド：計算の最小単位
スレッド1つが1画素を担当

ブロック：スレッドの集合

計測実験概要



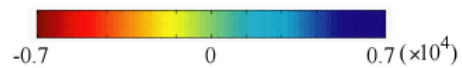
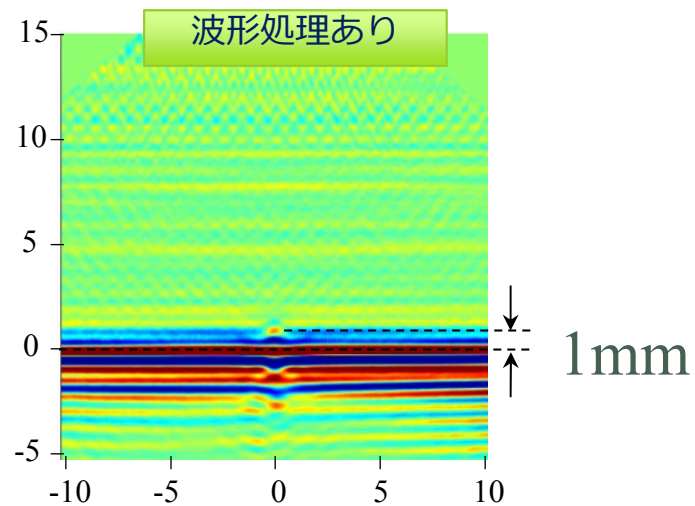
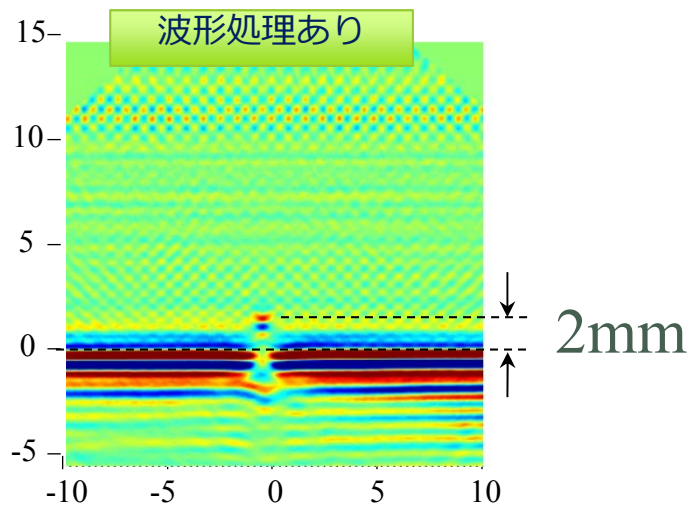
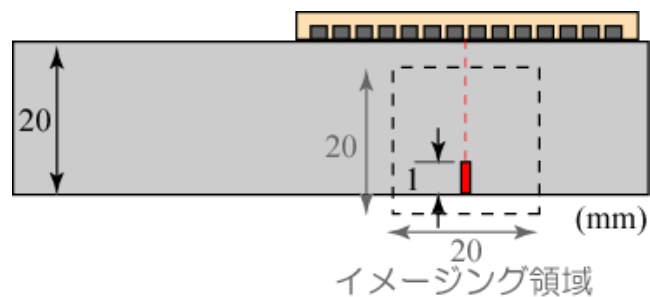
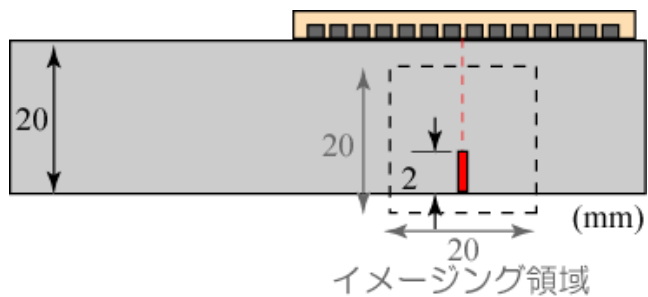
フェーズドアレイ探触子
(KGK)



電子スキャン装置
(日立エンジニアリングアンドサービス)

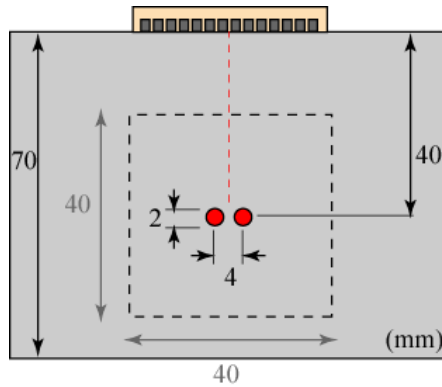


縦分解能の検討

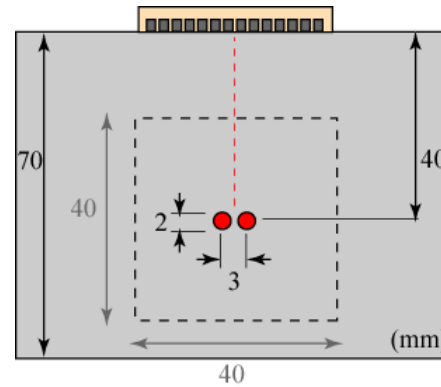


横分解能の検討

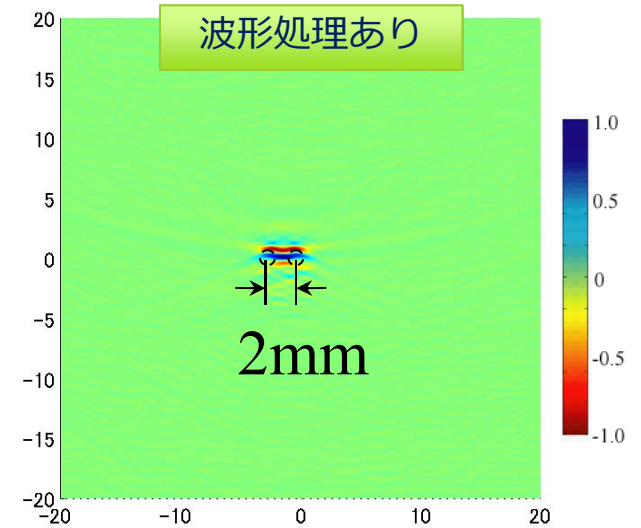
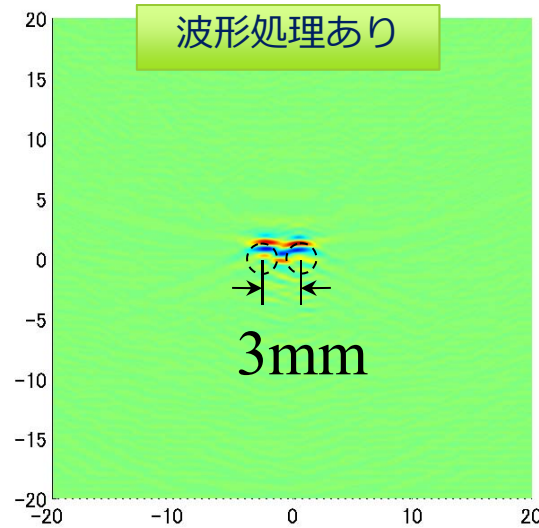
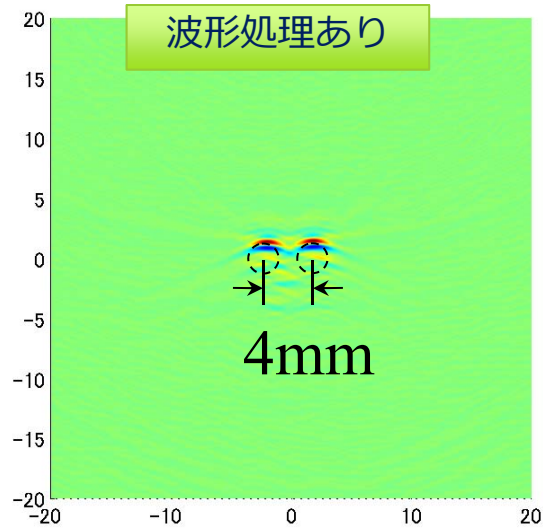
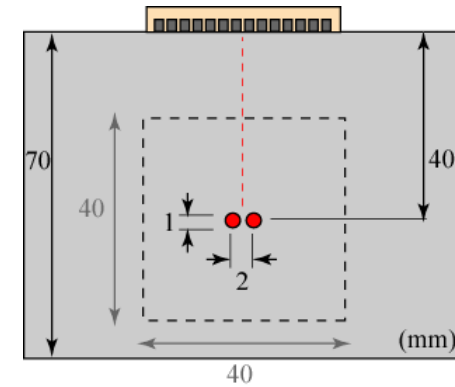
中心間距離：4mm



中心間距離：3mm



中心間距離：2mm



GPGPUによる高速映像化の検証

- NVIDIAのGPU : TeslaC2075による高速映像化検証

波形処理

CUFFTの導入によるデコンボリューション(64×64素子)

CPU計算 18.89sec → GPU計算 3.23sec

約6倍の高速化

欠陥映像化

(401×401画素の映像化の場合)

CPU計算 45.83sec → GPU計算 0.27sec

約140倍の高速化

2.2 フレキシブルアレイ探触子による映像化⁴⁾

一般的なアレイプローブは被検体との設置面が**平滑**



凹凸などの不規則な表面形状にはプローブをそのまま設置することができない



可撓性アレイプローブを用いれば、凹凸表面にプローブを設置することができる



一般的なフェーズドアレイ
プローブ

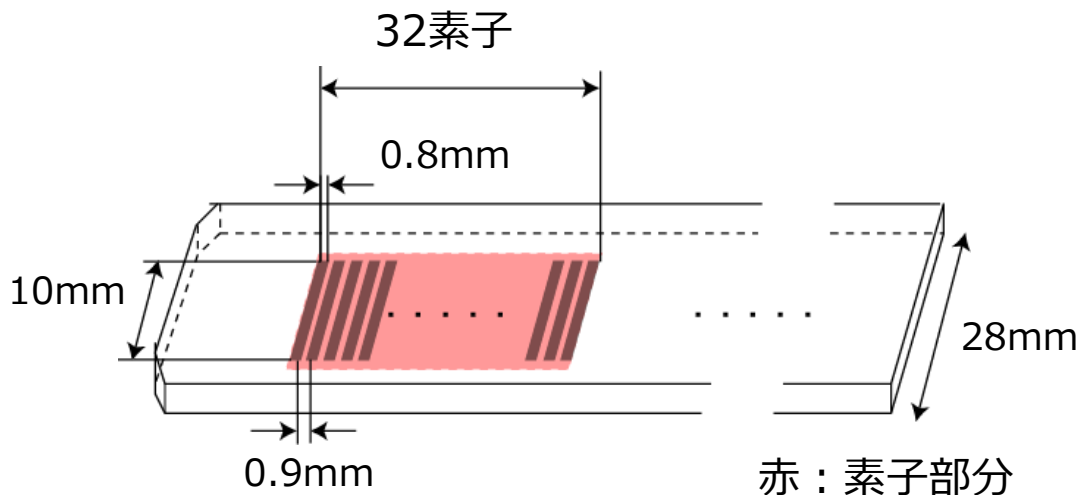


可撓性アレイプローブ
(直径30mmの自転車フレームに接着)

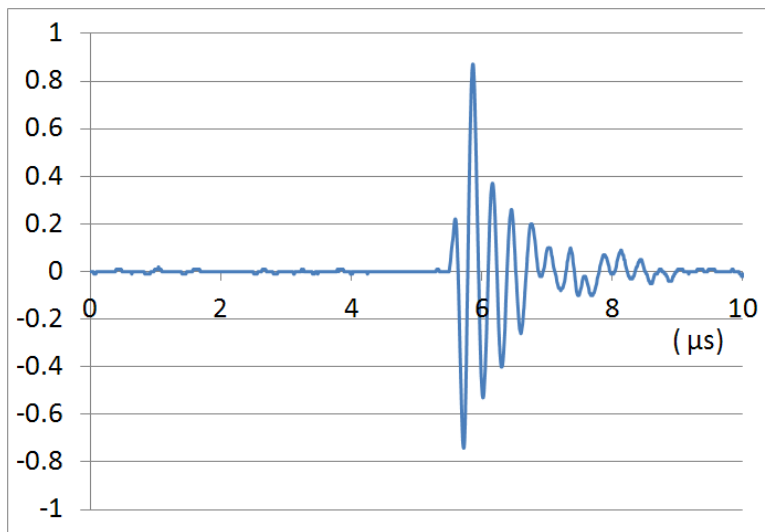
可撓性アレイプローブ



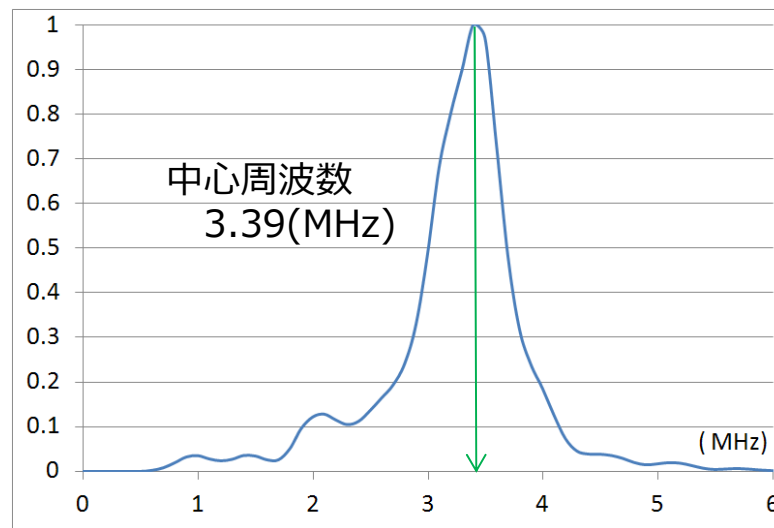
ジャパンプローブ製
公称中心周波数：3.0(MHz)



金属底面からの反射エコー



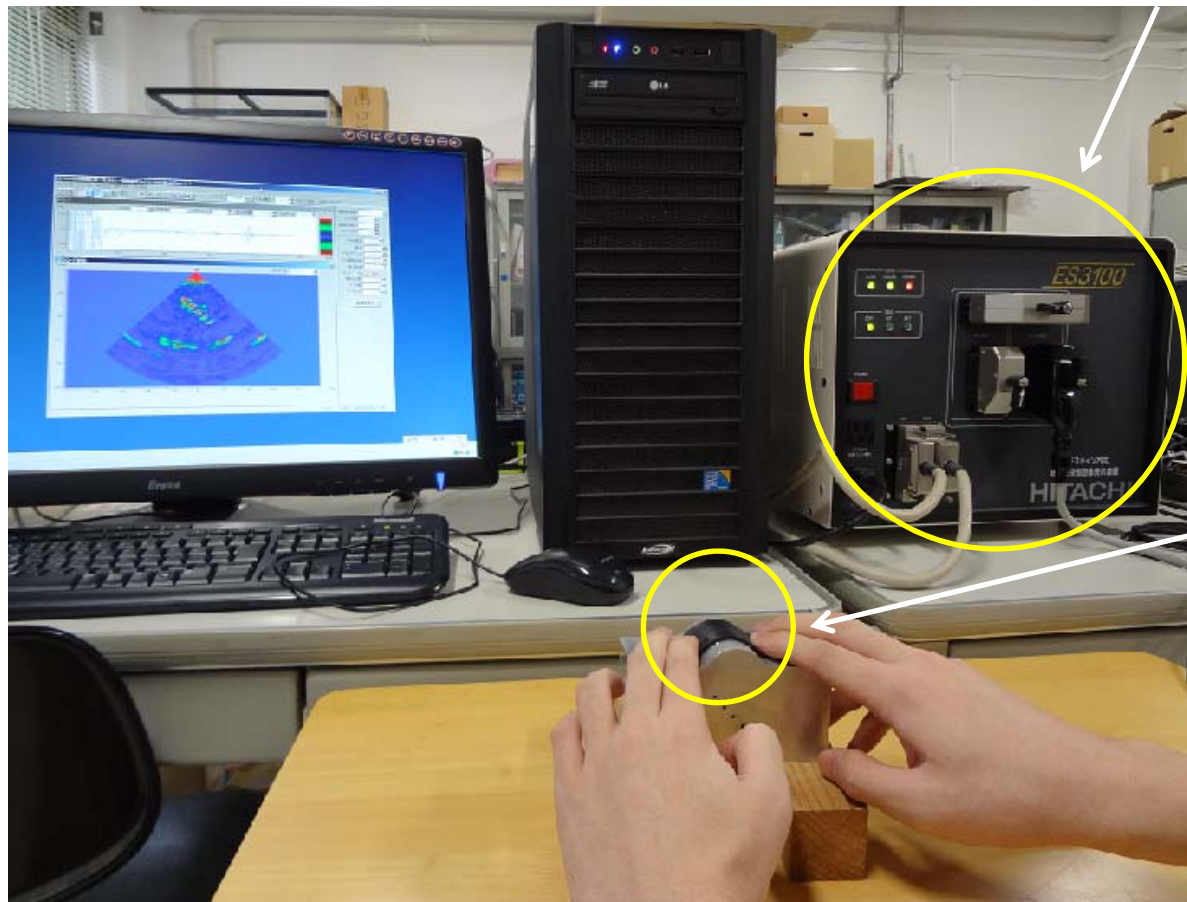
フーリエスペクトル



計測装置（フレキシブルアレイ探触子）

制御パソコン

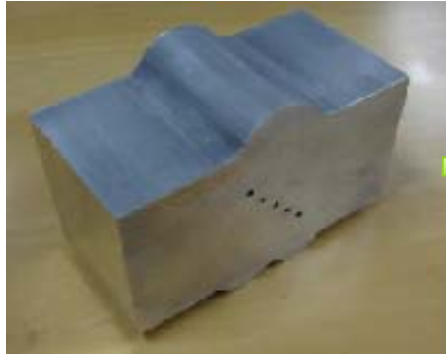
電子スキャン装置(ES3100*)
日立エンジニアリングアンドサービス製



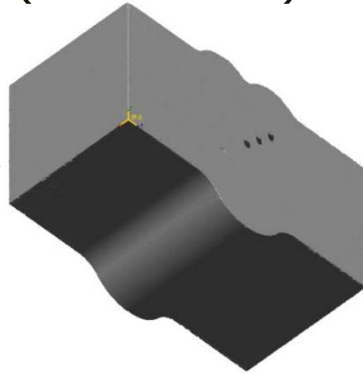
アレイプローブ

被検体概要と表面プロファイルの取得

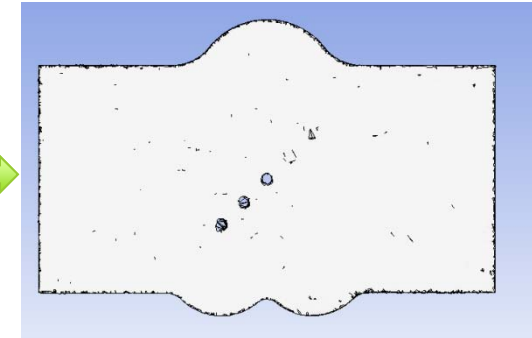
被検体



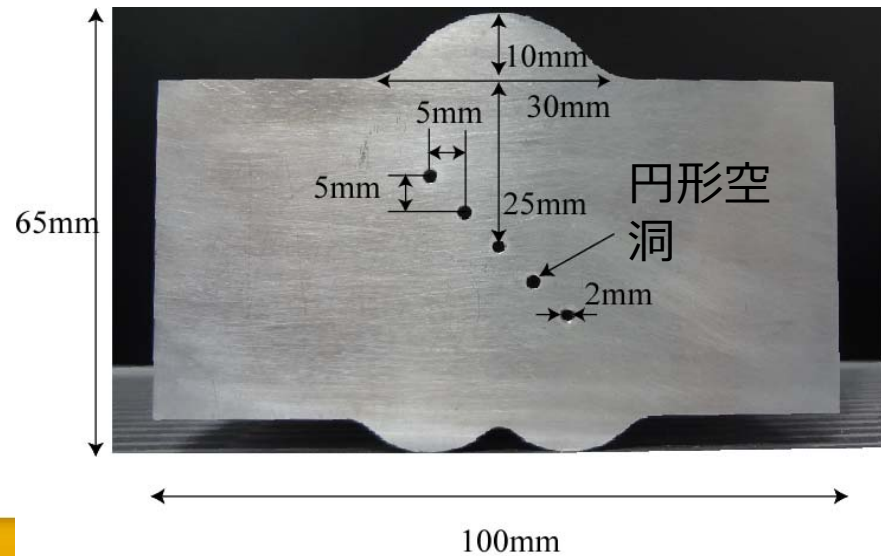
3次元表面データ
(stlファイル)



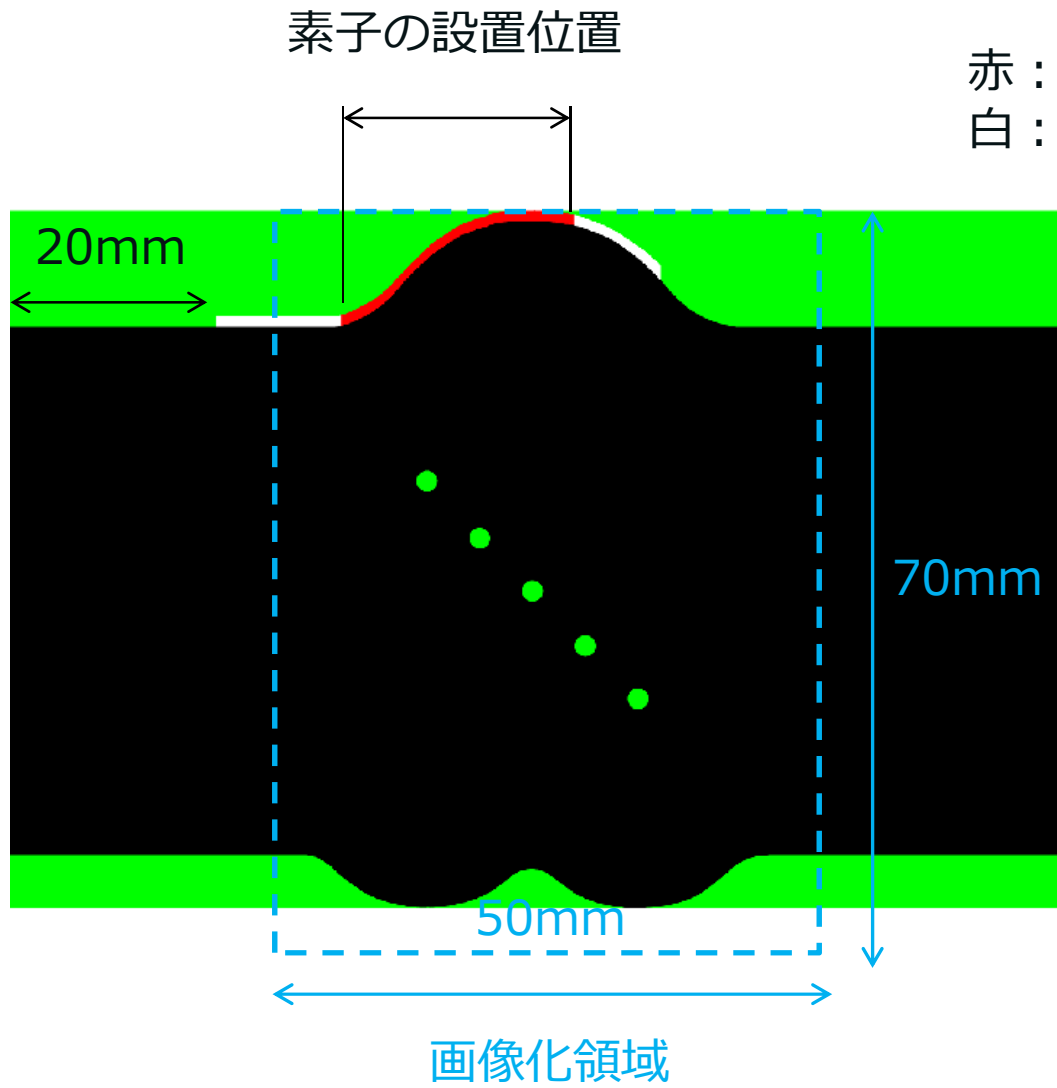
断面抽出



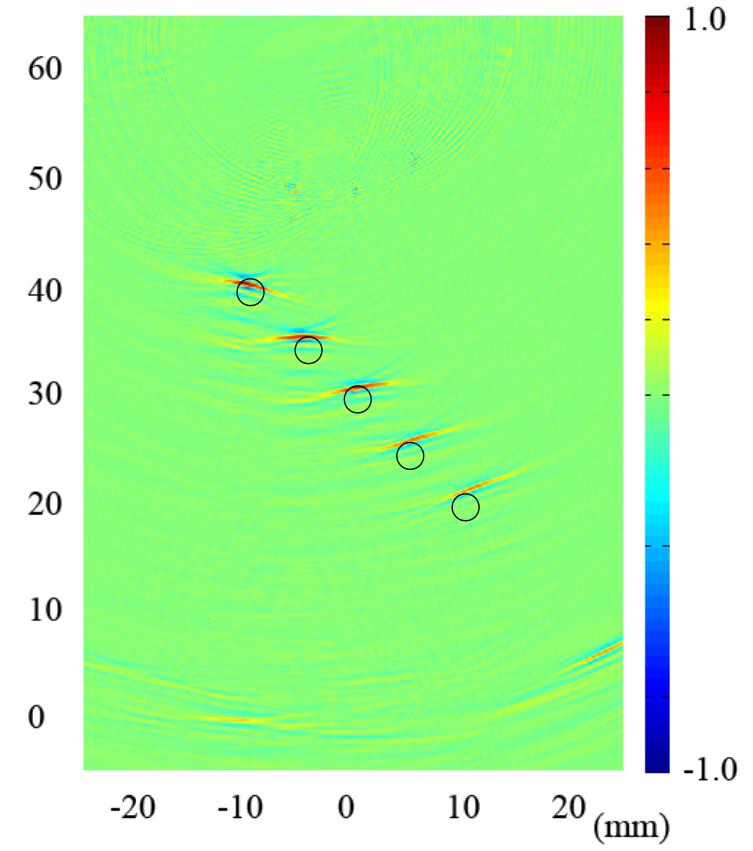
KONICA MINOLTA RANGE7
レーザー光による表面形状測定

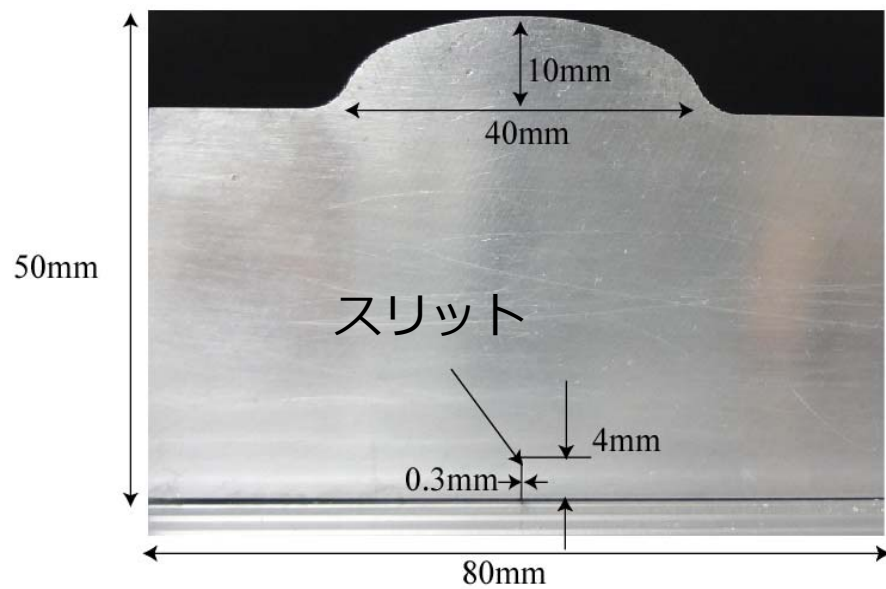


画像化結果1

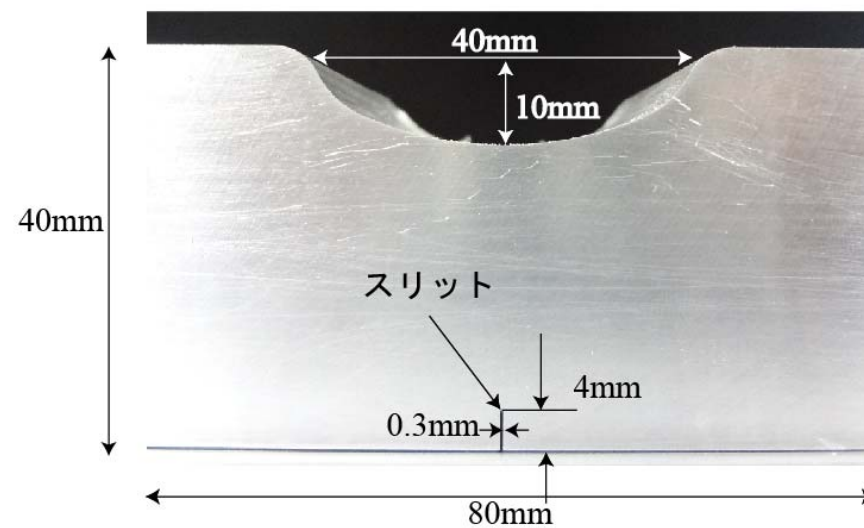


赤：素子部分
白：ゴム部分



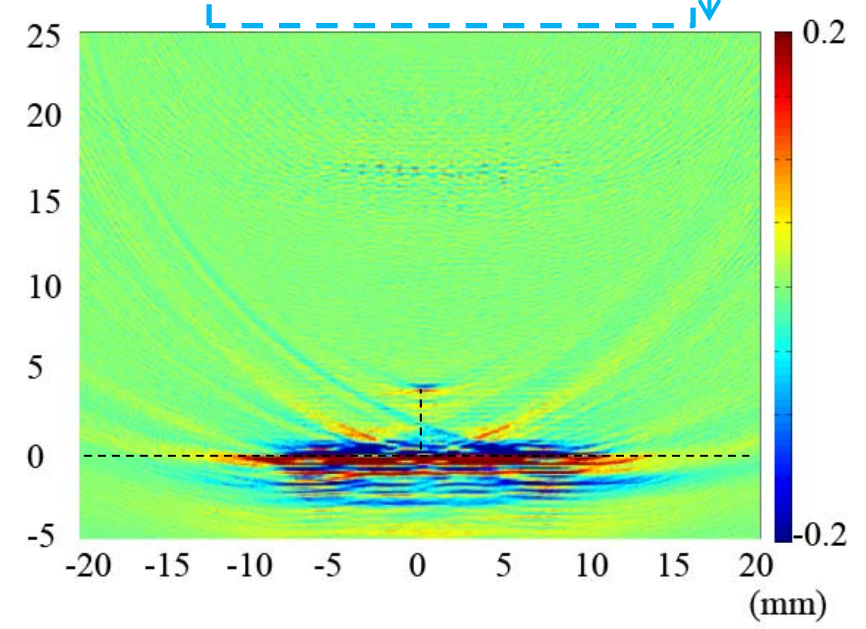
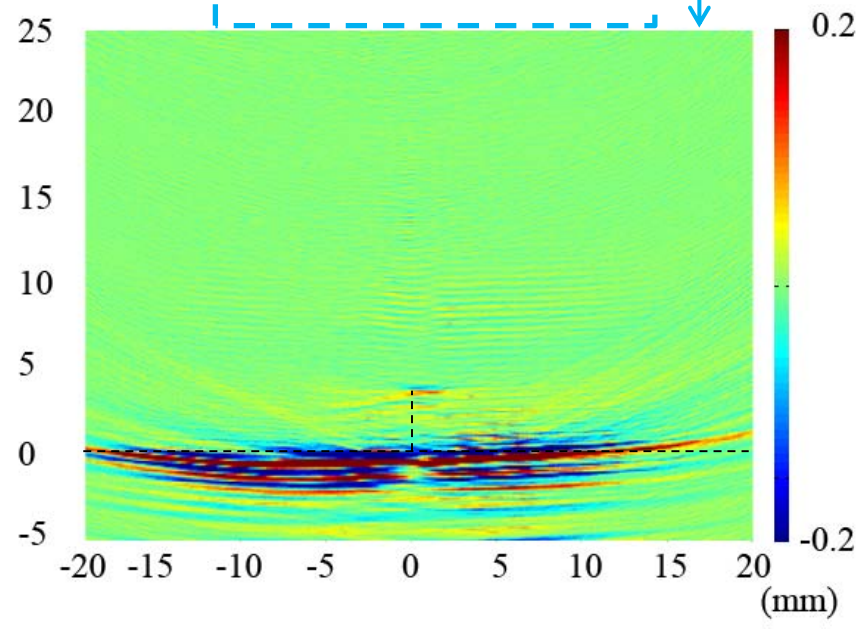
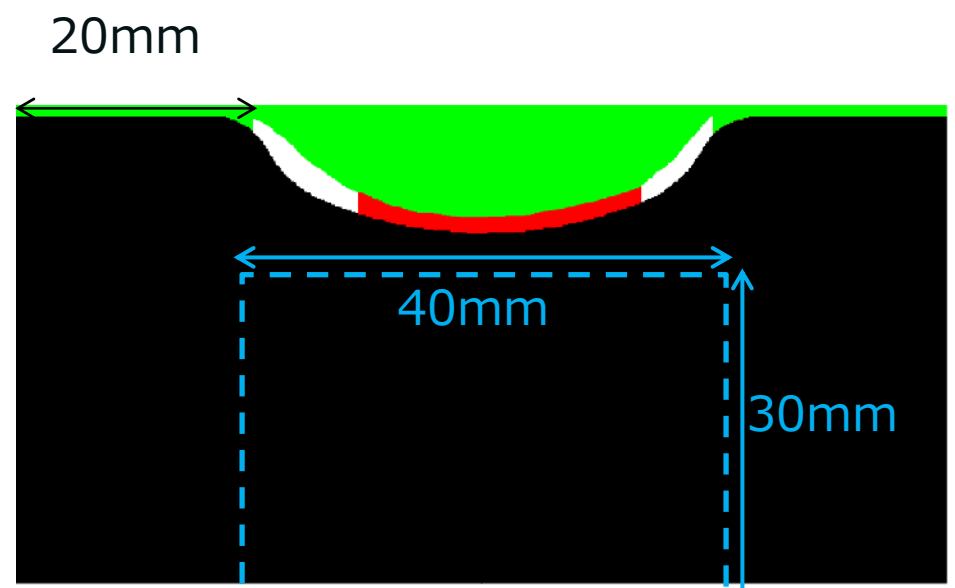
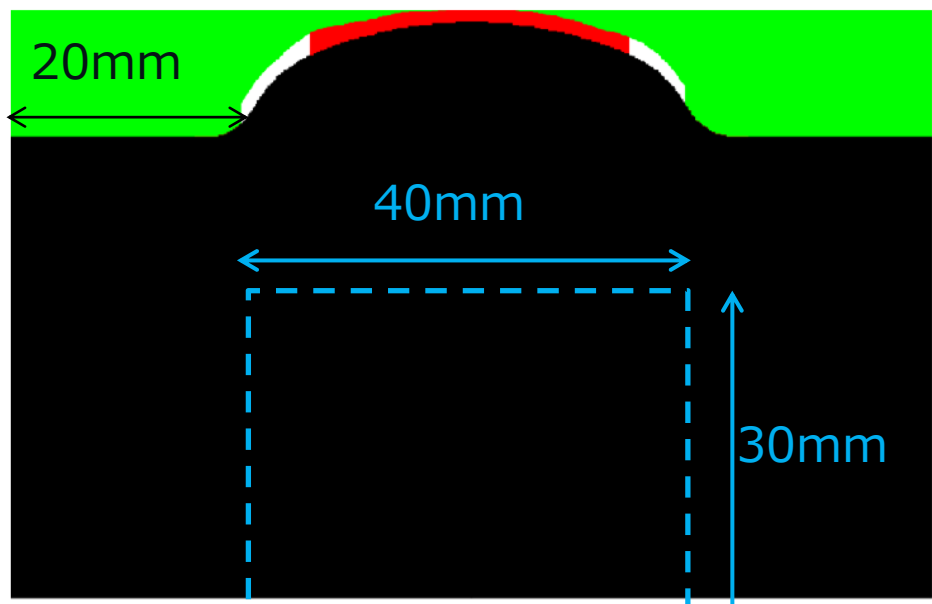


アルミニウム被検体(b)



アルミニウム被検体(c)

画像化結果2



2.3 低周波アレイ探触子によるコンクリートの映像化⁶⁾

FSAP方式を用いた内部欠陥の映像化

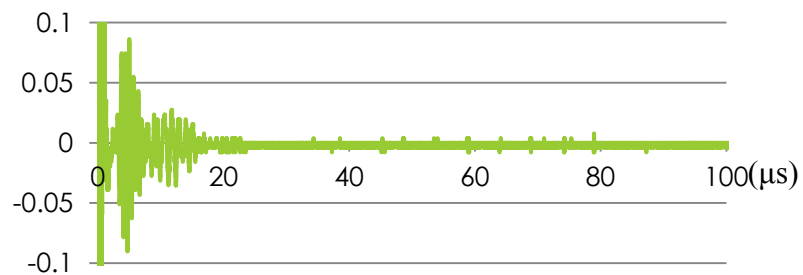
コンクリート構造部材の内部きず映像化に応用したい。



コンクリート供試体



断面図



コンクリート供試体から取得した波形
(中心周波数 $f=3\text{MHz}$)

懸念事項

コンクリートのような非均質材料は、波動が分散性を呈する場合がある。

骨材による多重散乱(減衰)が顕著である。



コンクリート中の波動場の検討

コンクリート中を伝搬する超音波のモデリング

【解析条件】

3波のバースト波

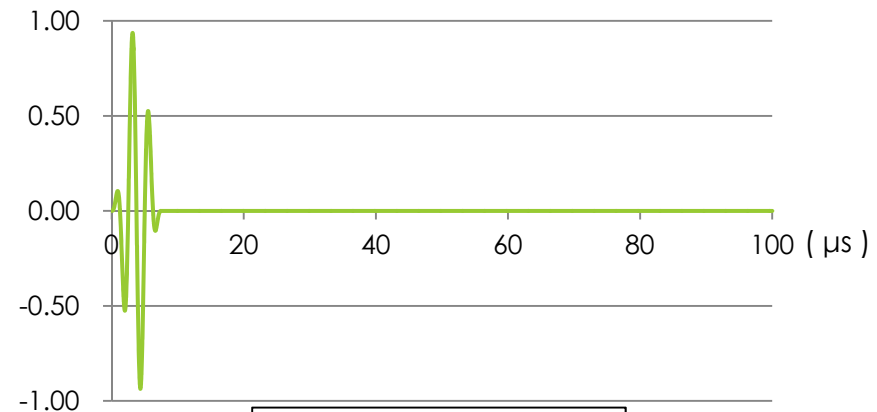
中心周波数 $f_c = 400 \text{ kHz}$

時間ステップ幅 $\Delta t = 0.005 \mu\text{s}$

総ステップ数 20000

モデルサイズ $1000 \times 4000 \text{ pixel}$

セル長 $\Delta x = 0.05 \text{ mm}$



入力信号(応力励起)

【セメントペースト】

$C_L = 3911.84 \text{ m/s}$, $C_s = 2258 \text{ m/s}$

$\rho = 1.979 \text{ g/cm}^3$

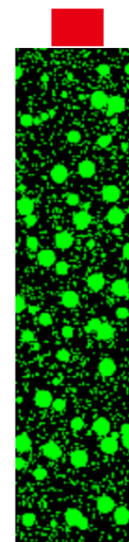
【骨材】

$C_L = 5450 \text{ m/s}$, $C_s = 3147 \text{ m/s}$

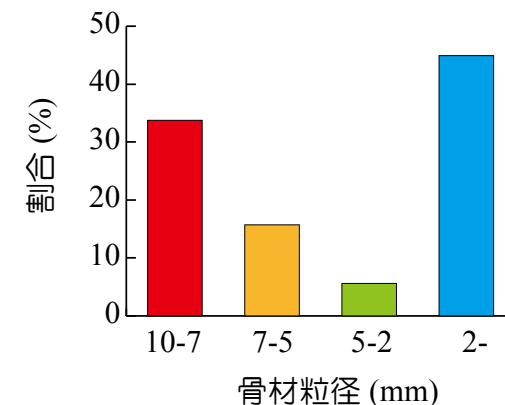
$\rho = 2.478 \text{ g/cm}^3$

※同時期に作成したセメントの材料定数と実際に使用した石の材料定数を用いた。

Probe

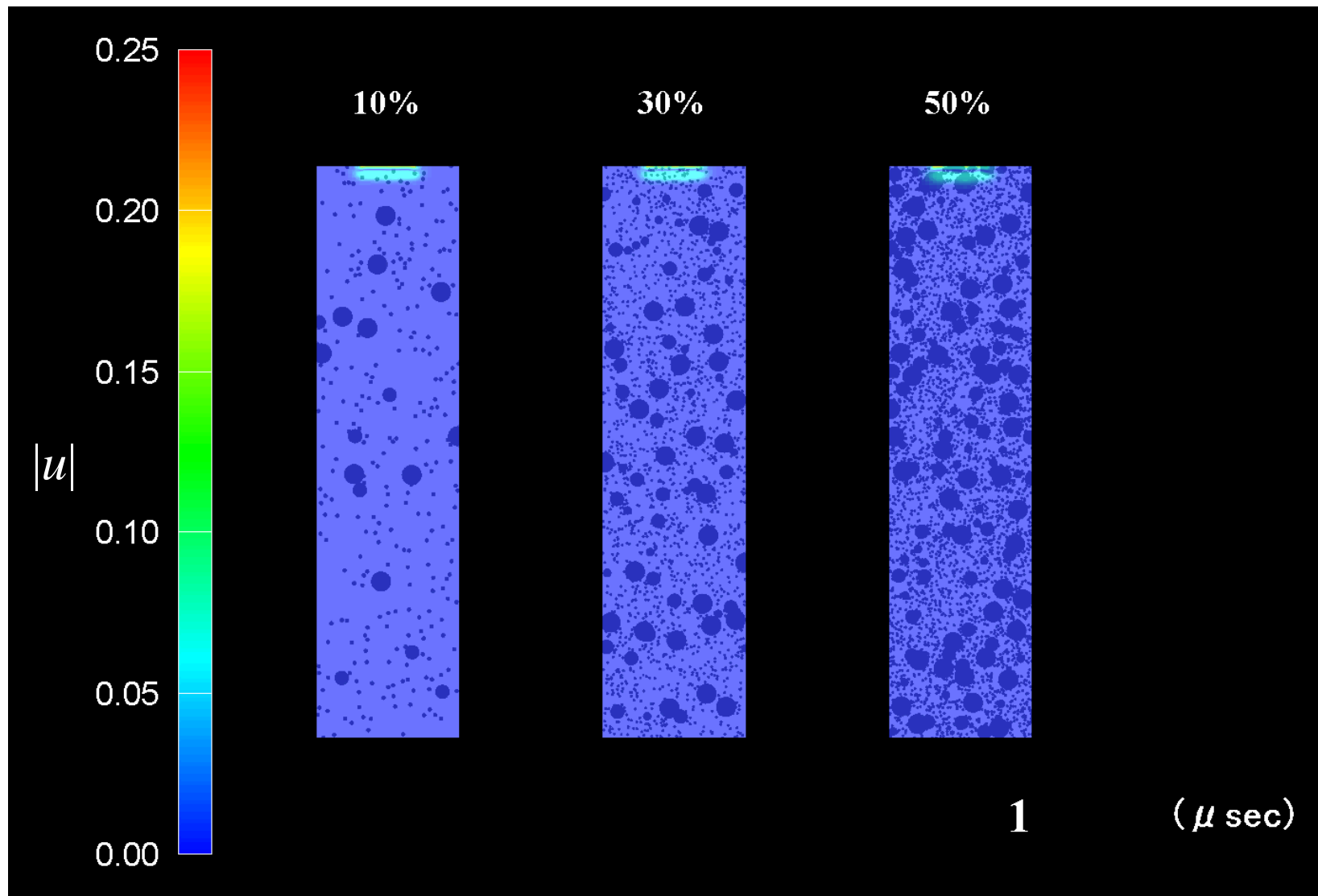


数値モデル(V.F=30%)



骨材の粒度分布率

超音波伝搬の挙動 ~Movie~



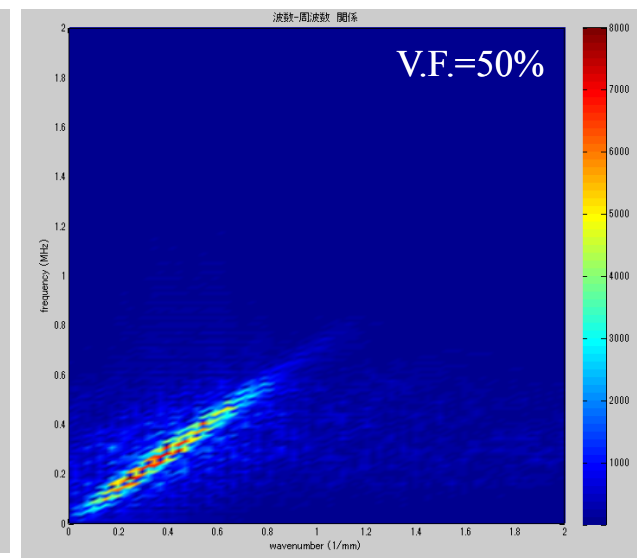
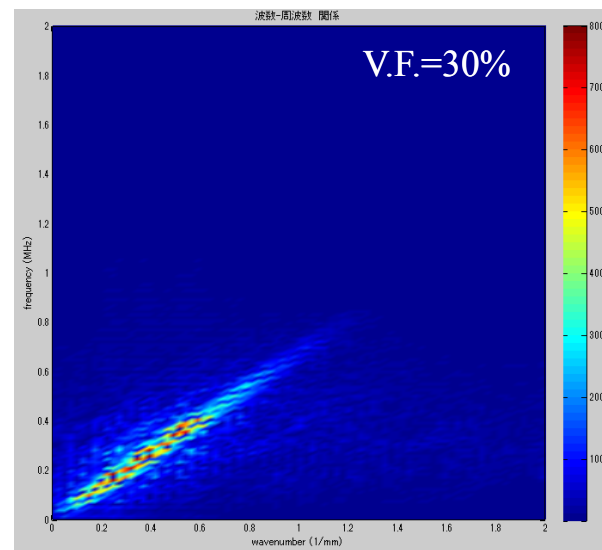
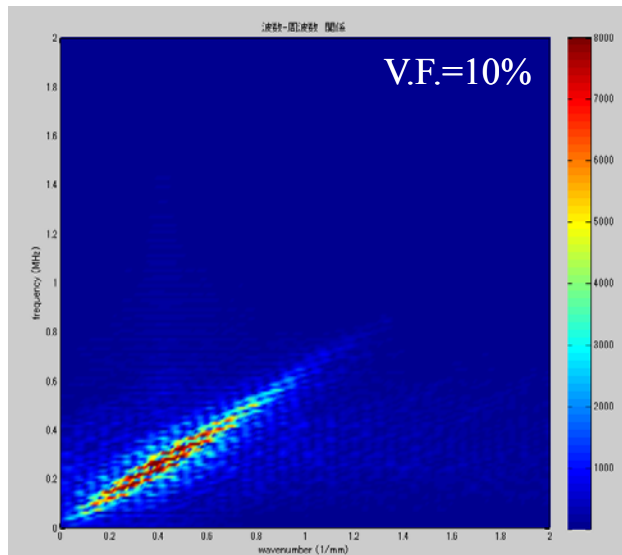
分散曲線図の出力結果

$$H(k, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_y(y, t) e^{i(ky - \omega t)} dy dt$$



$$f = \frac{c}{2\pi} k$$

分散曲線図において、
傾きが位相速度を表す。

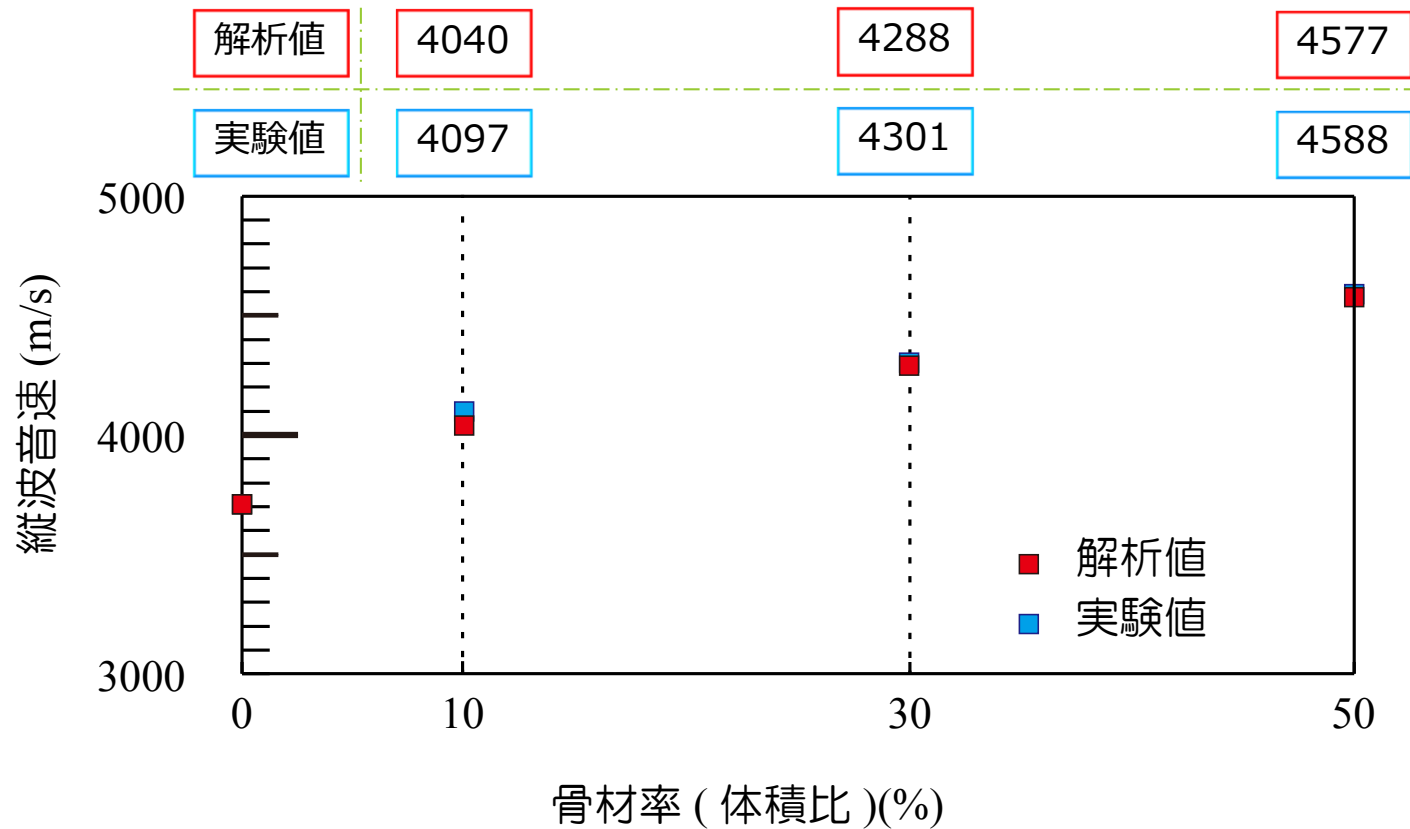


分散曲線図から、音速はほぼ一定で分散は顕著ではないことがわかる。



500kHz以上の周波数帯では、骨材による多重散乱の影響を強く受ける。
従って、500kHz以下の周波数帯を使用すれば多重散乱の影響が少ない。

縦波音速の比較



EFITによる解析結果と実験で得た値について、良好に一致している。



EFITによるコンクリートの波動場のモデル化が妥当であるといえる。

実験装置と供試体



超音波パルサレシーバ&
マルチプレクサ

3波のバースト波を送信

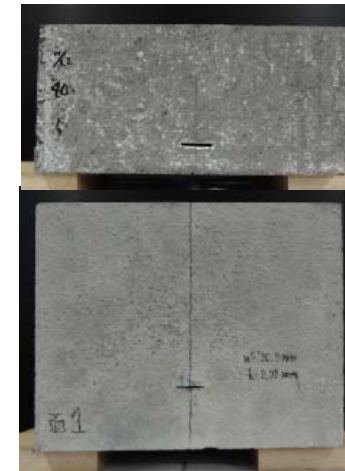
電圧 : 250~300 V



リニアアレイ探触子

アレイ総素子数 : 24, 16

中心周波数 : $f_c = 400, 200$ kHz

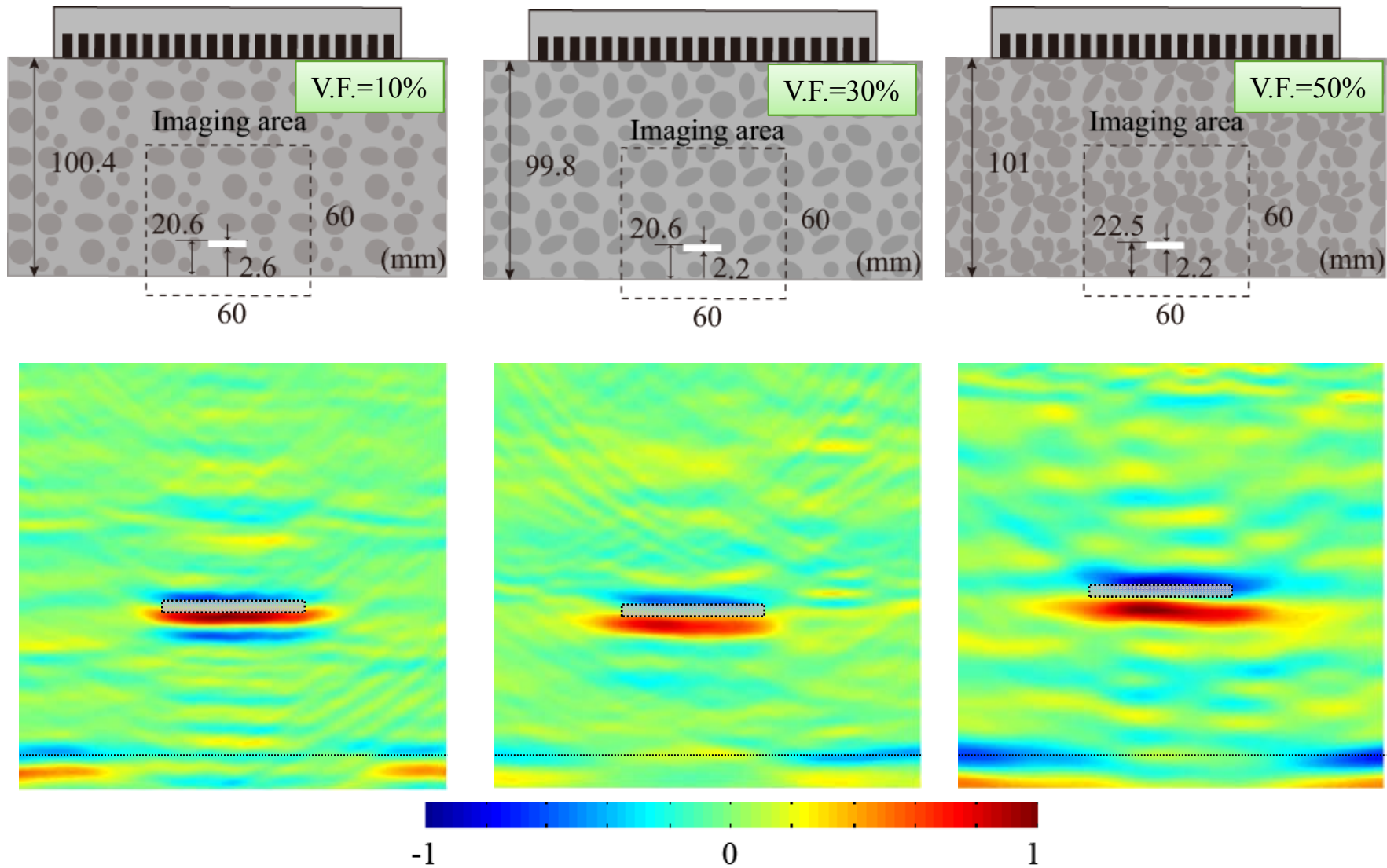


コンクリート供試体

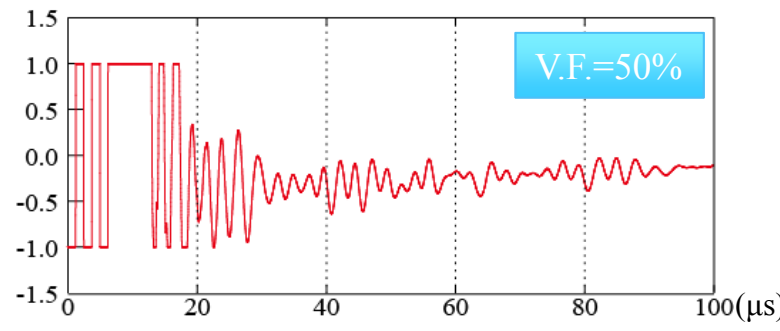
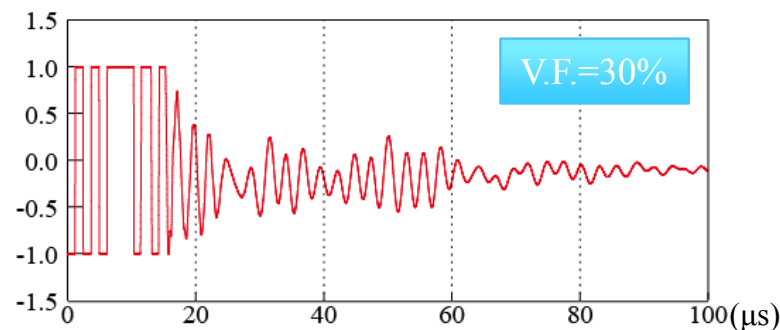
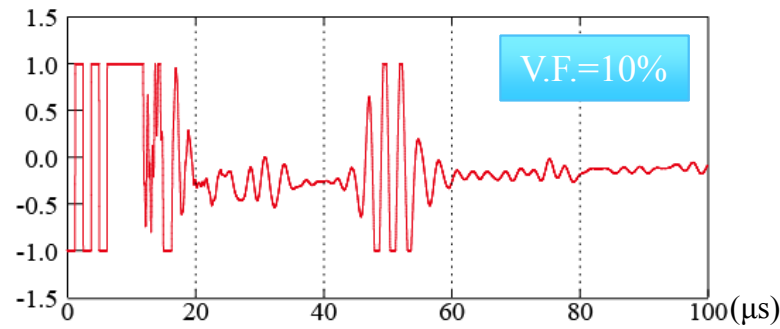
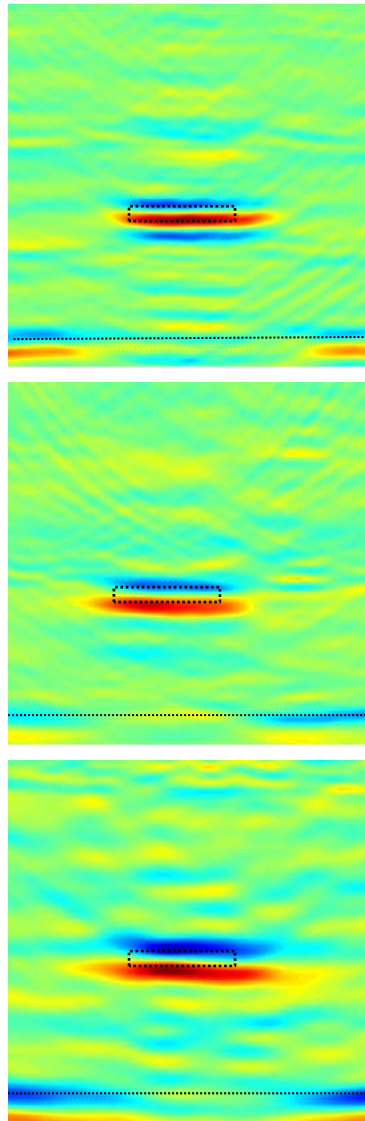
骨材率 : 10, 30, 50 %

供試体高さ : $h=100, 200$ mm

映像化結果 ~Array transducer 400kHz~



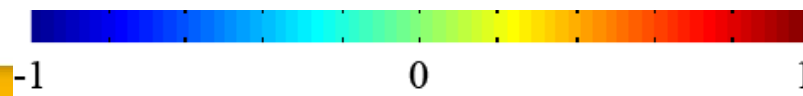
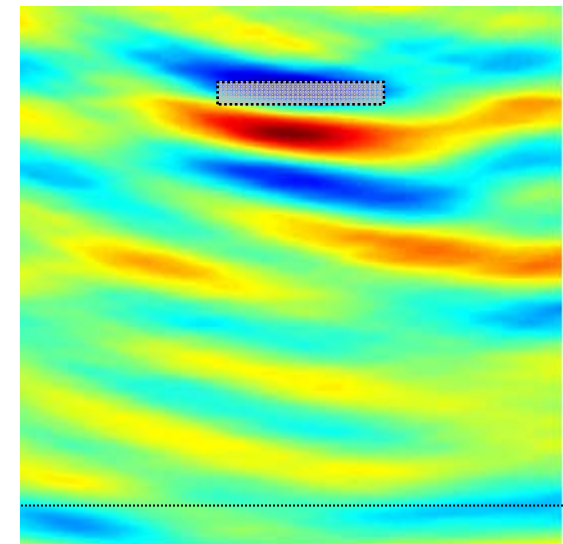
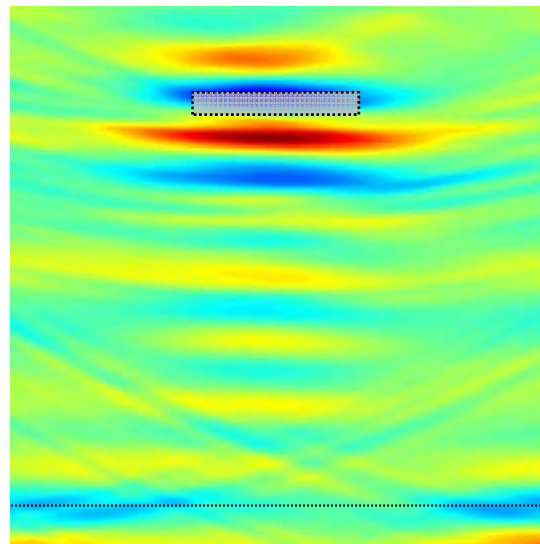
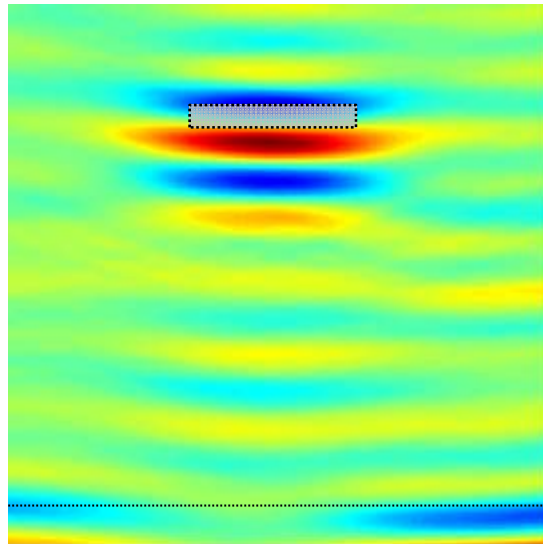
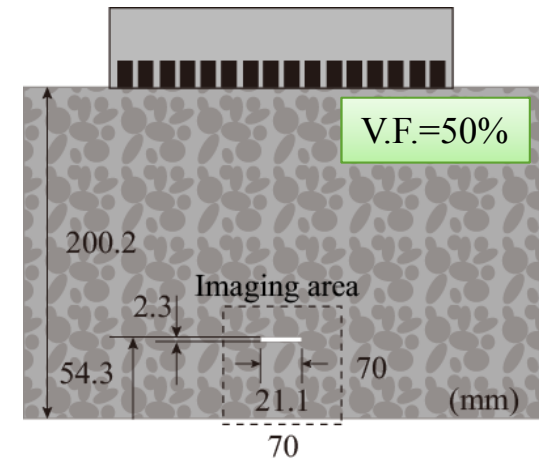
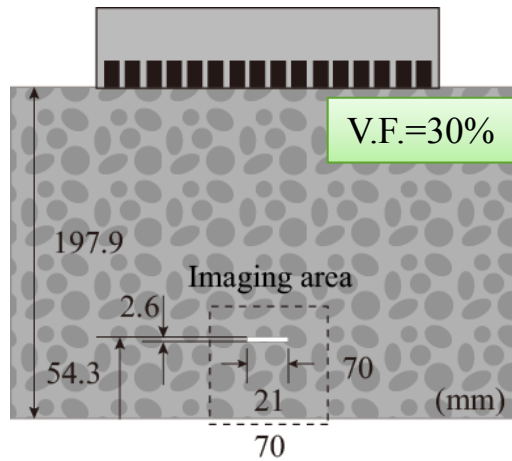
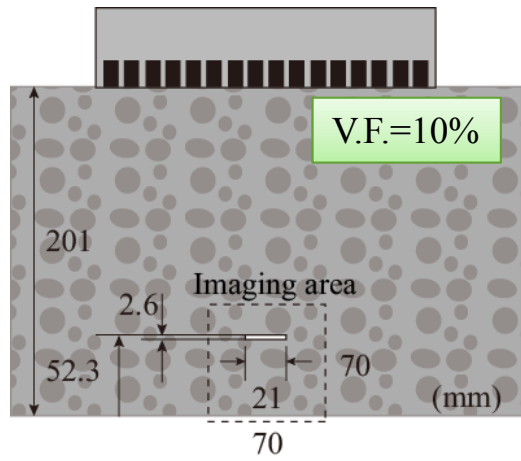
素子番号12 で送受信した波形



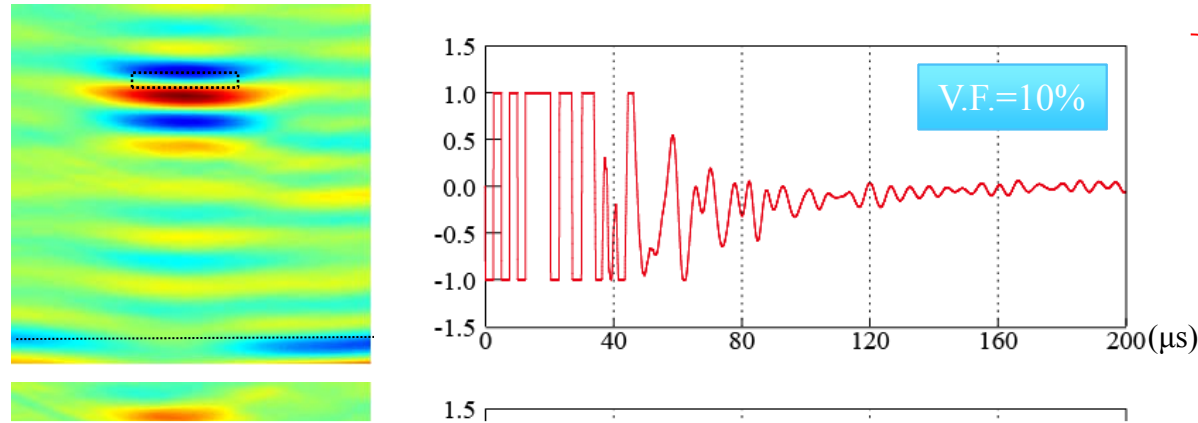
骨材率が増加するに伴い、
S/N比が大きく低下する。

▶ 波形図からは欠陥エコーを
判別することは困難。

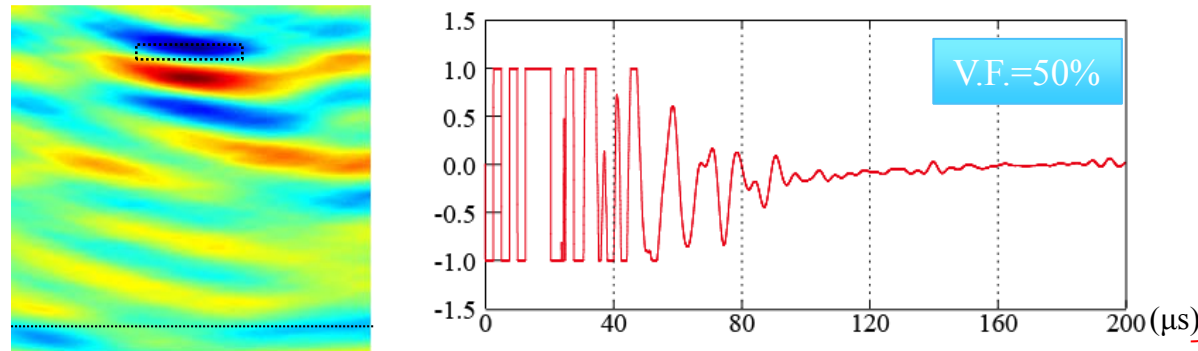
映像化結果 ~Array transducer 200kHz~



素子番号8 で送受信した波形



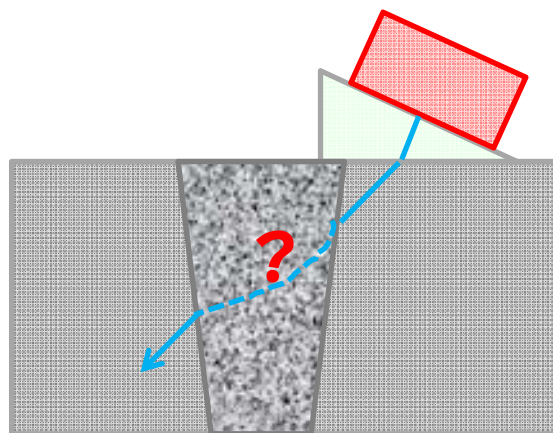
骨材や微小空隙からの散乱波成分はランダムノイズに相当する。
各送受信方向の波形を複数重ね合わせるFSAP方式では、ノイズが平均化されることで欠陥部からの散乱波成分が相対的に高くなるため、映像化が可能であると考えられる。



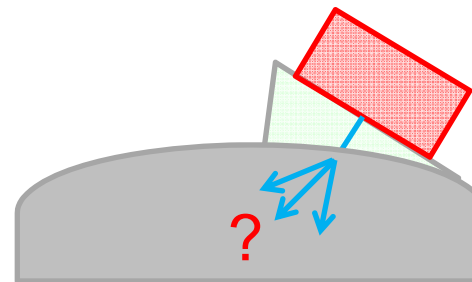
3. モデルベースのアレイ映像化手法 (時間反転法)

- 7) K. Nakahata and K. Kimoto, Reconstruction of flaws in heterogeneous media using image-based FIT and time reversal approach, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.6, No.6, pp.771-781, 2012.
- 8) K. Nakahata, K. Terada, T. Kyoya, M. Tsukino and K. Ishii, Simulation of ultrasonic and electromagnetic wave propagation for nondestructive testing of concrete using image-based FIT, Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, No.1, pp.28-37, 2012.

シミュレータを利用した新しい映像化⁷⁾の提案



被検体内部が
非均質，異方性材料



界面形状が複雑
(凹凸，ギザギザも)

簡単な計算では，
路程の推定が困難



数値解析的アプローチ
による路程の推定

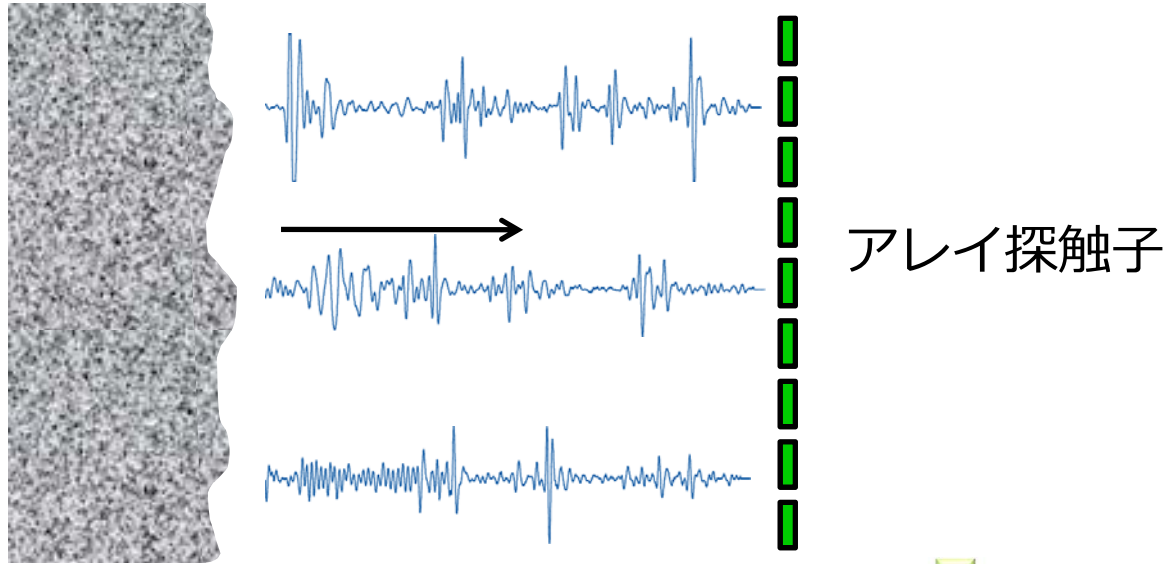
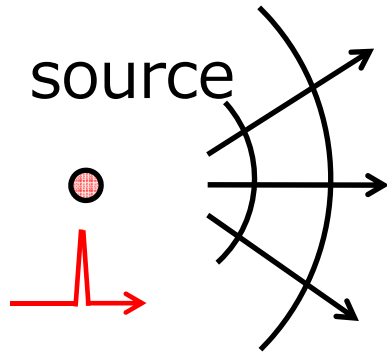
時間反転法*



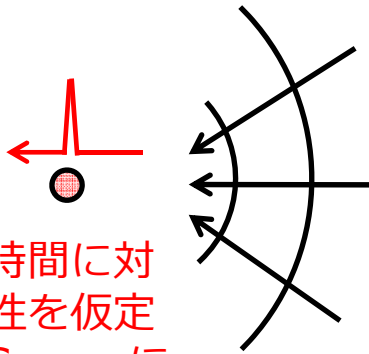
SWAN-21

* M. Fink: Time reversal of ultrasonic fields -- Part I: Basic principles,
IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control., 39(5), pp.555-566, (1992)

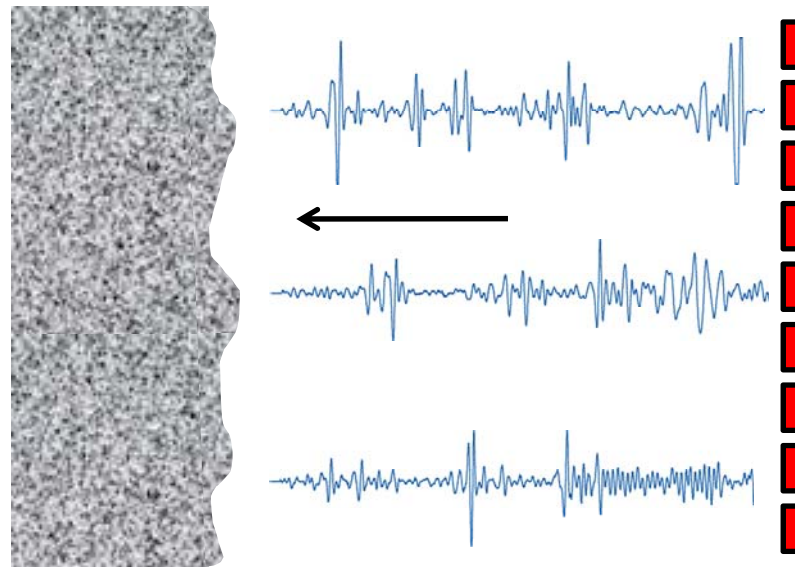
時間反転法の原理



計測されたエコーを時間反転して“入射”



弾性波の時間に対する可逆性を仮定すれば, Sourceに集束するはず

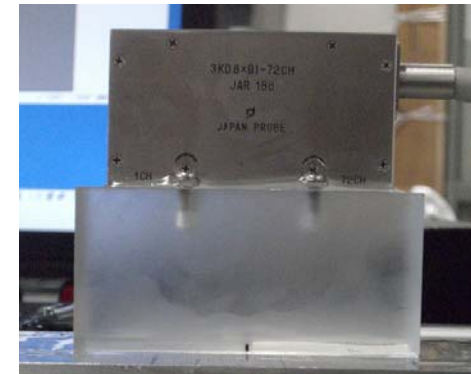


実験装置



電子スキャン装置

- ・日立エンジニアリングアンドサービス製
- ・1素子毎のパルス波の送受信が可能



アレイ探触子

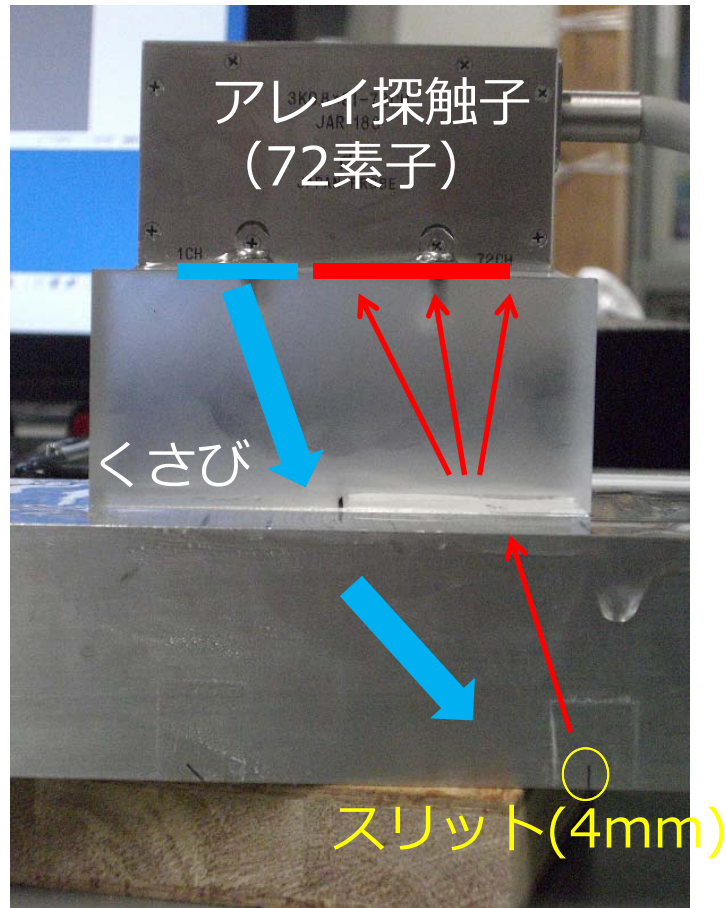
- ・ジャパンプローブ製
- ・中心周波数：3MHz(400KHz)
- ・N=64 (24)
- ・P=0.8mm(5mm)

くさび

- ・ジャパンプローブ製
- ・ポリスチレン

検証実験 1

「くさび-アルミ」の2媒質モデルで検証実験を行った。



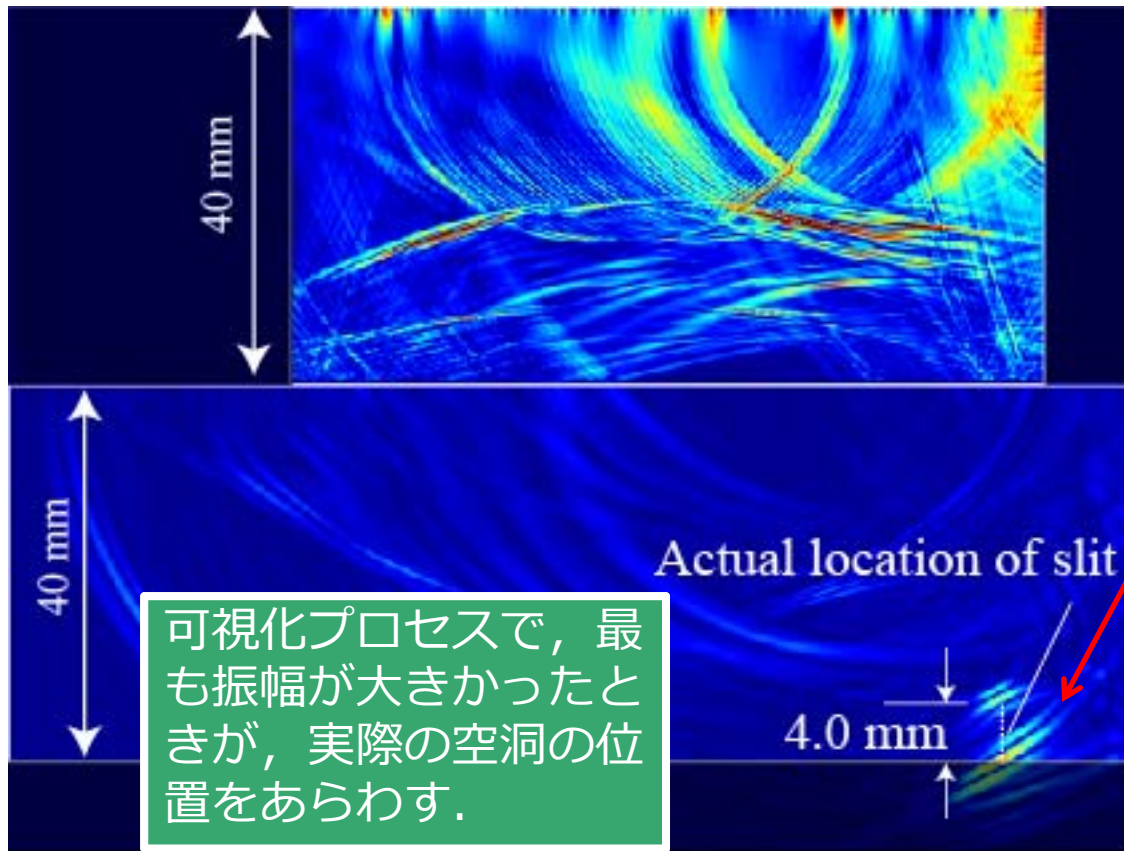
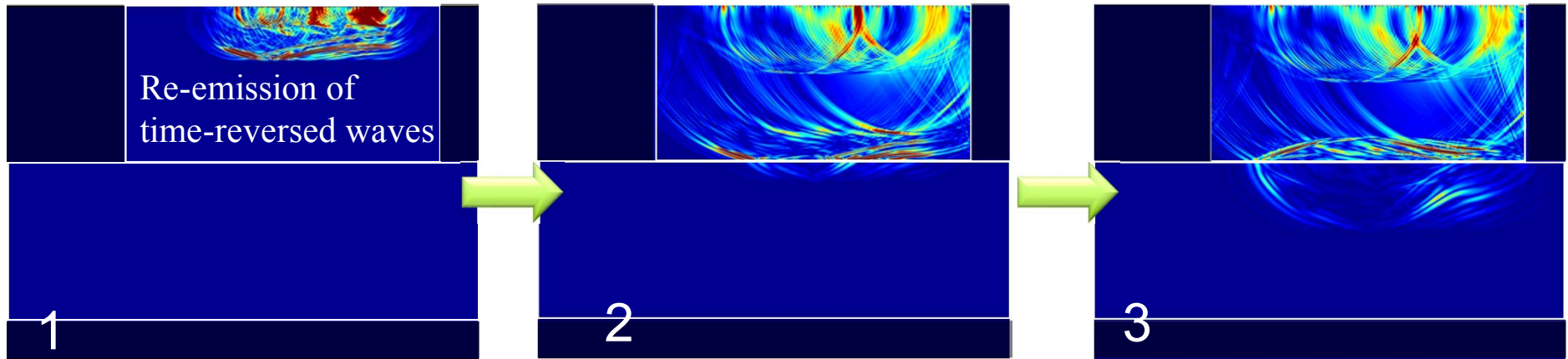
送信：素子No.1~24の合成波

受信：No.25~72素子（計48個）



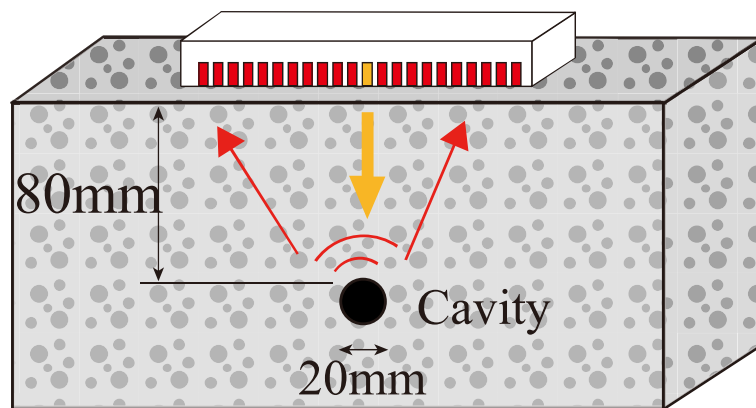
48個の受信波, 時間反転し,
「SWAN21」に入力する.



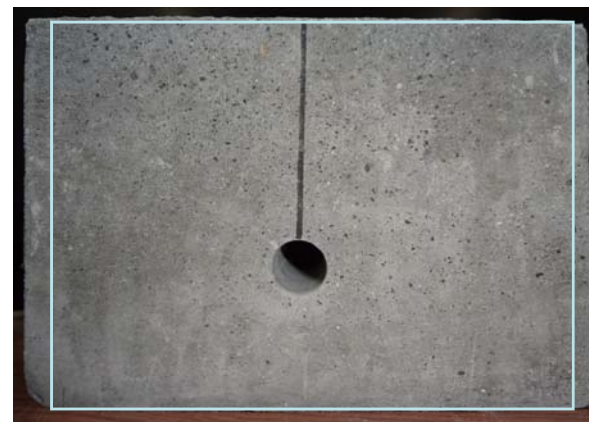


エコーはもともとスリットから来たものであるから、スリットに集束するはずである。

検証実験 2

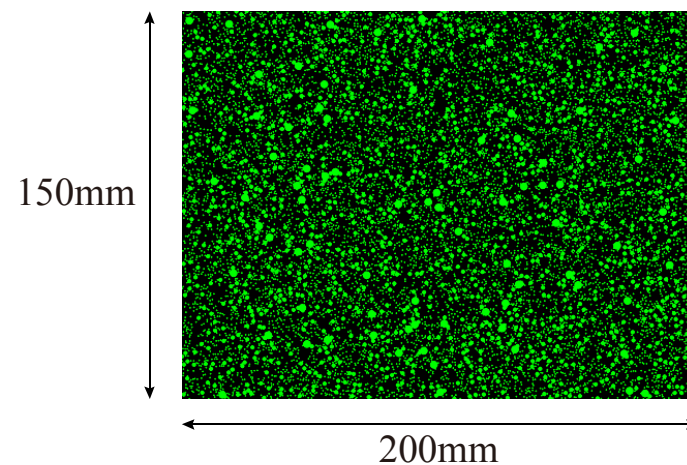


Mortar specimen (V.F.=30%)



↓ コンクリートの
数値モデル化⁸⁾

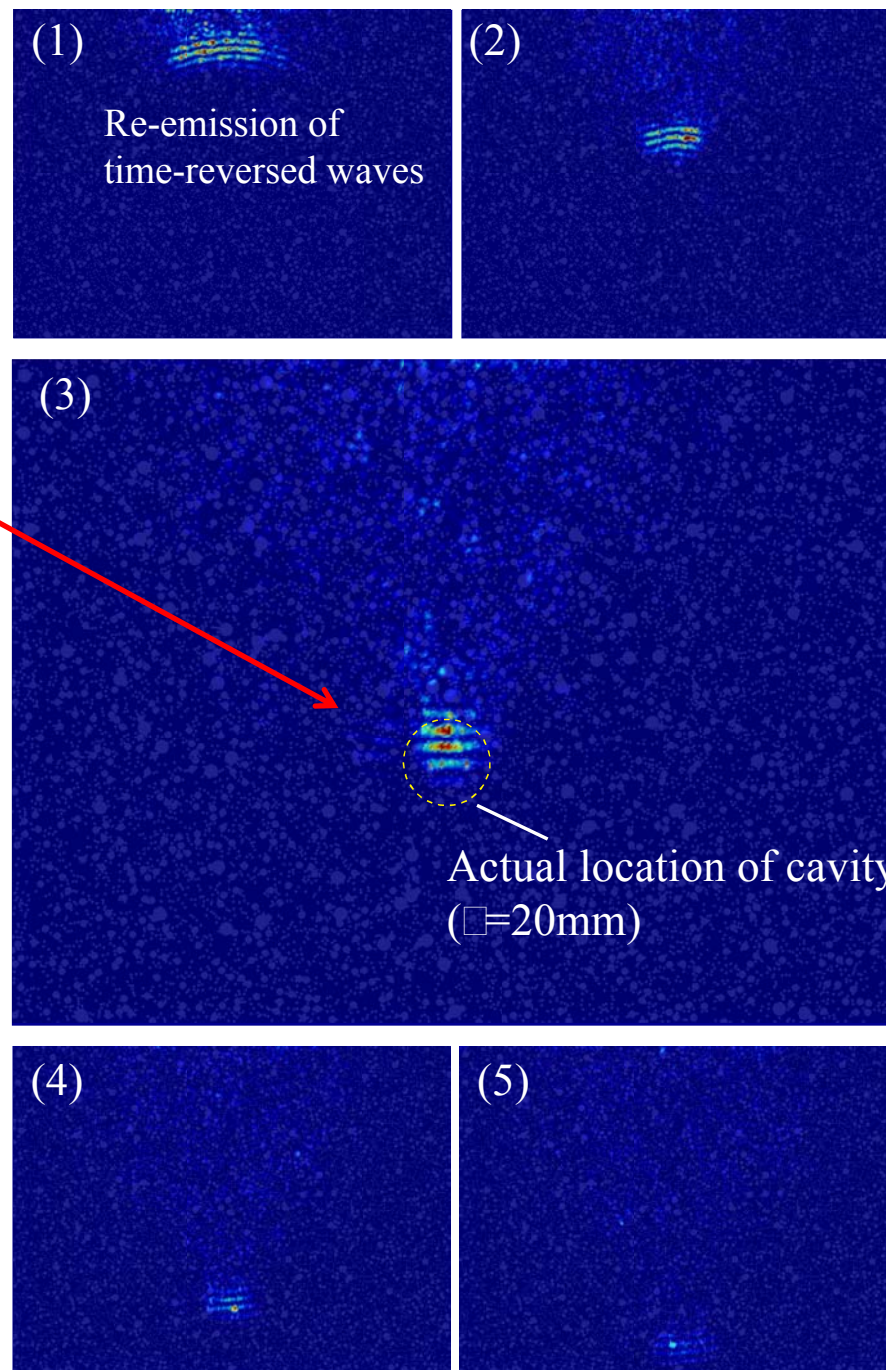
- 骨材($c_p=5450\text{m/s}$)
- セメント($c_p=3710\text{m/s}$)



- 公称中心周波数 : 400kHz
- $N=24$, $p=5\text{mm}$

エコーはもともと
空洞から来たものであるから、
空洞に集束するはずである。

可視化プロセスで、最も
振幅が大きかったときが、
実際の空洞の位置をあらわす。



まとめ

- ▶ **アレイ探触子のモデリングと放射特性**
時間領域よりも周波数領域における放射特性を評価する方が有用。
探触子の種類（2D or 3D）やピッチ等の正しい設定をする必要がある。
- ▶ **アレイ探触子によるきずの映像化（全波形サンプリング処理方式）**
電子スキャン装置を使用しない新しいアレイ映像化手法。
集束ビームを各画素に送信するため、高分解能な映像化が可能。
GPU計算によるリアルタイム映像化。
- ▶ **モデルベースのアレイ映像化（時間反転法）**
非均質・異方性波動場に応用可能。
複雑な外形をもつ被検体にも利用できるモデルベースの映像化手法。
シミュレータの精度・高速性がキー。

展望

- ▶ 検査概念のパラダイムシフト
(ハードウェアはデジタル化→ソフトウェア(計算技術)の積極的介入)